



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

INFLUENCIA DEL ÁRIDO RECICLADO Y LA UTILIZACIÓN DEL AGUA DE MAR EN LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN

Treball realitzat per:

Albert Planas Ventura

Dirigit per:

Miren Etxeberria Larrañaga

Grau en:

Enginyeria de la construcció

Barcelona, **20 de juny de 2014**

Departament d'Enginyeria de la construcció

TREBALL FINAL DE GRAU

AGRADECIMIENTOS

Una vez finalizado este proyecto y, analizado todo el camino hasta llegar a este punto, uno es consciente de todo el esfuerzo y todo el aporte de todas las personas que han hecho posible la realización de este trabajo.

Agradecer de manera sincera a mi tutora, Miren Etxeberria, por su confianza y tiempo dedicado en este trabajo y, por todos los conocimientos y transmitidos a lo largo de la investigación. Quiero hacer también mención especial tanto para Andreu como para Anna, por sus consejos y colaboración en sumas fases del trabajo.

Como no, dar las gracias también a todo el equipo técnico del Laboratorio de Materiales de Construcción y Estructuras de la Escuela Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puentes de la Universidad Politécnica de Catalunya, por todo su esfuerzo y colaboración.

Finalmente, a mis amigos, mis hermanos y especialmente a mi madre por haber estado a mi lado y haberme apoyado en todo momento.

A todos ellos mis más sinceros agradecimientos.

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE LOS HORMIGONES FABRICADOS CON ÁRIDOS RECICLADOS MIXTOS Y AGUA DE MAR

AUTOR: PLANAS VENTURA, ALBERT

TUTORA: ETXEBERRIA LARRAÑAGA, MIREN

Con este proyecto se pretende analizar la posibilidad de utilizar áridos reciclados mixtos producidos en la planta de reciclaje ubicada en el Puerto de Barcelona y agua de mar, en la fabricación de hormigones en masa destinados a la construcción de obras portuarias.

Primeramente se han estudiado las características y propiedades de los áridos reciclados mixtos, con el fin de valorizar al máximo su utilización en la fabricación de hormigones. Por otro lado, este estudio también ha servido para interpretar los resultados obtenidos en los posteriores ensayos de los hormigones elaborados con áridos reciclados.

Se fabricaron hormigones con 20%, 50% y 100% de árido reciclado utilizando tanto agua dulce como agua de mar. Todos los hormigones se produjeron utilizando dos tipos de cementos convenientes para ambientes marítimos, tipo CEMI 42.5 SR y CEMIII/A 42.5N/SR. Los resultados obtenidos se compararon con los obtenidos por lo hormigones convencionales.

Se estudió el comportamiento en estado fresco y endurecido de todos los hormigones. Respecto al primero, se analizó tanto el tiempo de fraguado como la retracción plástica de los hormigones. En cuanto al estado endurecido de los hormigones, se realizaron múltiples ensayos para determinar las propiedades físicas y mecánicas, así como las retracciones autógena y de secado. La fase experimental se realizó en tres etapas.

La primera etapa se destinó al estudio del tiempo de fraguado, donde se han realizado ocho tipos diferentes de hormigones, la mitad fabricados con áridos convencionales y la otra mitad con un 100 % de sustitución de áridos reciclados.

En la segunda etapa, se estudió, por un lado, las propiedades físicas con ensayos de densidad seca, volumen de poros accesibles y absorción. Por otro lado, también se analizaron las propiedades mecánicas a compresión, flexo-tracción y módulo de elasticidad de los hormigones. En esta etapa se ha incluido la fabricación de hormigones con un 50 % y un 20 % de sustitución de áridos reciclados.

En la tercera y última etapa, se realizaron los ensayos de retracción plástica, retracción autógena y retracción de secado. Los hormigones utilizados han sido los mismos que en la primera etapa.

Se concluye que la utilización de agua de mar en la fabricación de hormigones mejora sus propiedades físicas y mecánicas, no mostrando apenas variación en las retracciones a edades tempranas. Por otro lado, con el uso de áridos reciclados en bajos porcentajes, se obtienen propiedades muy similares a las de los hormigones convencionales, siendo en todos los casos aptos para su utilización según la normativa vigente.

ABSTRACT

TITLE: INFLUENCE OF RECYCLED AGGREGATE AND USE OF SEA WATER IN THE CONCRET PROPERTIES

AUTHOR: PLANAS VENTURA, ALBERT

TUTOR: ETXEBERRIA LARRAÑAGA, MIREN

This project aims to analyze the possibility of using mixed recycled aggregates produced in the recycling plant located in the Port of Barcelona and seawater in the manufacture of concrete intended for port works.

The first things that have been investigated are characteristics and properties of mixed recycled aggregates, in order to optimize their use in the manufacture of concrete. Furthermore, this study also served to interpret the results obtained in later tests of concrete made with recycled aggregates.

Concrete with 20%, 50% and 100% recycled aggregate using conventional water and sea water were made. All the concretes were produced using two types of cements suitable for marine environments, CEMI 42.5 SR y CEMIII/A 42.5N/SR. The results were compared with those obtained by the conventional concrete.

Behavior was studied in fresh and hardened concrete of all. Regarding the former, we analyzed both the setting time as plastic shrinkage of concrete. As for concrete hardened state, multiple tests were conducted to determine the physical and mechanical properties, as well as weld and drying shrinkage. The pilot phase was conducted in three stages.

Behavior was studied in fresh and hardened concrete of all. Regarding the former, we analyzed both the setting time as plastic shrinkage of concrete. As for concrete hardened state, multiple tests were conducted to determine the physical and mechanical properties, as well as weld and drying shrinkage. The pilot phase was conducted in three stages.

The first phase was devoted to the study of the setting time. Eight different types of concretes have been made, a half with conventional aggregate and the other half with 100% recycled aggregate replacement.

In the second stage, we have studied, on one hand, the physical properties with dry density tests pore volume tests, and absorption test. On the other hand, the properties are also analyzed the mechanical compressive strength and flexural modulus properties of the concretes. This stage included the manufacture of concrete with 50% and 20% substitution of recycled aggregates.

In the third and final stage, Plastic shrinkage tests, autogenous shrinkage and drying shrinkage is performed. The concretes used were the same as in the first stage.

We conclude that the use of seawater in the manufacture of concrete improves its physical and mechanical properties, not just showing variation in shrinkage at early ages. Moreover, using low percentages of recycled aggregates, we obtain very similar properties to conventional concrete, being in all cases suitable for use in accordance with regulations properties.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	1
RESUMEN	2
ABSTRACT	3
ÍNDICE	4
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	7
1.1. ASPECTOS GENERALES	7
1.2. OBJETIVOS	7
1.3. METODOLOGIA DE ESTUDIO	8
1.4. ESTRUCTURA DE LA TESINA	8
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	10
2.1. INTRODUCCIÓN	10
2.2. ÁRIDOS RECICLADOS MIXTOS	11
2.2.1 NORMATIVA Y LEGISLACIÓN	11
2.2.2 PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS	13
2.2.2.1 NORMATIVA TÉCNICA	13
2.2.2.2 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS	16
2.2.3 PROPIEDADES DE LOS HORMIGONES CON ÁRIDOS RECICLADOS	19
2.2.3.1 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS	20
2.2.3.2 APLICACIONES	20
2.2.3.3 DURABILIDAD DE LOS HORMIGONES CON ÁRIDOS RECICLADOS	22
2.2.3.4 RETRACCIONES	22
2.3. AMBIENTE MARINO	24
2.3.1 CLASES DE EXPOSICIÓN SEGÚN NORMATIVA EHE-08	24
2.3.2 EXIGENCIAS PARTICULARES PARA HORMIGONES EXPUESTOS AL AMBIENTE MARINO	25
2.3.3 DURABILIDAD DE LOS HORMIGONES EN AMBIENTE MARINO	26
2.3.3.1 ATAQUE POR CLORUROS	26
2.3.3.2 ATAQUE PRO SULFATOS	27
2.3.3.3 ATAQUE ÁLCALI-SÍLICE	27
2.3.4 APLICACIONES PORTUÁRIAS	28
CAPÍTULO 3: FASE EXPERIMENTAL	31
3.1. INTRODUCCIÓN	31
3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	31
3.2.1 CEMENTO	31
3.2.2 ÁRIDOS	32
3.2.2.1 COMPOSICIÓN	32
3.2.2.2 GRANULOMETRIA	32
3.2.2.3 DENSIDAD Y ABSORCIÓN	34
3.2.2.4 ÁRIDOS RECICLADOS MIXTOS	34
3.2.2.5 ÁRIDOS NATURALES	36
3.2.3 ADITIVO	36
3.3. FABRICACIÓN DE LOS HORMIGONES	37
3.3.1 NOMENCLATURA DE LAS PROBETAS	38

3.3.2 DOSIFICACIÓN	39
3.3.3 FABRICACIÓN	40
3.3.4 LLENADO DE PROBETAS, COMPACTACIÓN Y CONSERVACIÓN	41
3.4. ENSAYOS REALIZADOS	45
3.4.1 ENSAYOS DE PROPIEDADES FÍSICAS	46
3.4.1.1 ENSAYOS DE DENSIDAD, ABSORCIÓN Y VOLUMEN DE POROS ACCESIBLES	46
3.4.2 ENSAYOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS	47
3.4.2.1 ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN	47
3.4.2.2 ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXO-TRACCIÓN	49
3.4.2.3 MÓDULO DE ELASTICIDAD	50
3.4.3 TIEMPO DE FRAGUADO	50
3.4.4 RETRACCIONES	52
3.4.4.1 RETRACCIÓN PLÁSTICA	52
3.4.4.2 RETRACCIÓN AUTÓGENA	53
3.4.4.3 RETRACCIÓN DE SECADO	54
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	56
4.1. INTRODUCCIÓN	56
4.2. PROPIEDADES FÍSICAS	57
4.2.1 DENSIDAD SECA	57
4.2.1.1 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL	58
4.2.1.2 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CON ÁRIDOS RECICLADOS	58
4.2.1.3 COMPARATIVA ENTRE HORMIGÓN CONVENCIONAL Y HORMIGÓN RECICLADO	59
4.2.2 VOLUMEN DE POROS ACCESIBLES	61
4.2.2.1 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL	62
4.2.2.2 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CON ÁRIDOS RECICLADOS	62
4.2.2.3 COMPARATIVA ENTRE HORMIGÓN CONVENCIONAL Y HORMIGÓN RECICLADO	63
4.2.3 ABSORCIÓN	66
4.2.3.1 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL	66
4.2.3.2 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CON ÁRIDOS RECICLADOS	67
4.2.3.3 COMPARATIVA ENTRE HORMIGÓN CONVENCIONAL Y HORMIGÓN RECICLADO	68
4.3 PROPIEDADES MECÁNICAS	70
4.3.1 ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN	70
4.3.1.1 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL	72
4.3.1.2 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CON ÁRIDOS RECICLADOS	73
4.3.1.3 COMPARATIVA ENTRE HORMIGÓN CONVENCIONAL Y HORMIGÓN RECICLADO	75
4.3.2 ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXO-TRACCIÓN	79
4.3.2.1 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL	80
4.3.2.2 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CON ÁRIDOS RECICLADOS	80
4.3.2.3 COMPARATIVA ENTRE HORMIGÓN CONVENCIONAL Y HORMIGÓN RECICLADO	81
4.3.3 MÓDULO ELÁSTICO	84
4.3.3.1 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL	84
4.3.3.2 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CON ÁRIDOS RECICLADOS	85
4.3.3.3 COMPARATIVA ENTRE HORMIGÓN CONVENCIONAL Y HORMIGÓN RECICLADO	86

RECICLADO	
4.4. TIEMPO DE FRAGUADO	88
4.5. RETRACCIONES	91
4.5.1 RETRACCIÓN PLÁSTICA	91
4.5.2 RETRACCIÓN AUTÓGENA	94
4.5.3 RETRACCIÓN DE SECADO	97
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	102
5.1. ÁRIDOS	102
5.2. HORMIGÓN	102
5.2.1 PROPIEDADES FÍSICAS	102
5.2.2 PROPIEDADES MECÁNICAS	103
5.2.3 TIEMPO DE FRAGUADO	103
5.2.4 RETRACCIONES	104
5.3. CONCLUSIONES GENERALES	104
5.4. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	105
BIBLIOGRAFIA	106

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. ASPECTOS GENERALES

La degradación del medio ambiente de forma desmesurada causada por el hombre a lo largo de los años para la extracción de materias primas, junto con, la no revalorización de los residuos producidos, ha causado un grave problema de sostenibilidad. En el sector de la construcción este hecho se agrava dada la gran demanda de recursos naturales y de la generación de abundantes residuos.

Es por tanto que en los últimos años, se están intentando revalorizar parte de los residuos generados a través de investigaciones que determinen la calidad de estos y su posible reciclaje.

Por este motivo, el presente estudio pretende seguir en busca de soluciones, para la gran cantidad de residuos generados en este sector como lo son los áridos reciclados, además de, investigar por otro lado, la posible utilización de recursos naturales mucho más abundantes, como puede ser el agua de mar.

La cantidad de áridos reciclados producidos y la no revalorización de los mismos suponen un problema tanto económico como medioambiental. Así mismo el agua natural es un recurso con una repercusión económica muy importante en obras de gran dimensión, donde el volumen de hormigón a utilizar es muy elevado.

La intención de este proyecto es profundizar en las investigaciones realizadas y ampliar los conocimientos referentes a esta temática referente a la revalorización de áridos reciclados y utilización de agua de mar en la fabricación del hormigón, y poder otorgar un valor añadido a estos recursos para su posterior aplicación en obras de la construcción.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo de este estudio es analizar la influencia que tiene la utilización de agua de mar y la sustitución de áridos reciclados, en diferentes porcentajes, sobre las propiedades físicas i mecánicas, tiempo de fraguado y retracciones de los hormigones tanto en estado fresco como endurecido.

Como objetivos específicos se destacan los siguientes:

- Validar la calidad de los áridos reciclados obtenidos de la planta de reciclaje del Puerto de Barcelona, con el fin de ser utilizados para la fabricación de hormigones.
- Analizar el porcentaje óptimo de sustitución de árido natural por árido reciclado para que los hormigones resultantes puedan ser comparables al hormigón convencional.
- Estudiar las propiedades de densidad seca, volumen de poros accesibles y absorción en los diferentes hormigones fabricados.
- Caracterizar las propiedades a compresión, flexo-tracción y módulo elástico para cada tipo de hormigón considerado en el estudio.

- Analizar el tiempo de fraguado en función del tipo de hormigón fabricado
- Realizar el estudio comparativo de los diferentes hormigones en relación al comportamiento frente a las retracciones plásticas, autógenas y de secado.
- Analizar la viabilidad de la utilización del agua de mar y de los áridos reciclados en la construcción de obras portuarias.

1.3. METODOLOGIA DE ESTUDIO

Se entiende como metodología el conjunto de procedimientos utilizados en este trabajo con el fin de alcanzar los objetivos expuestos anteriormente.

El primer procedimiento, como en todo estudio, ha sido la búsqueda de información bibliográfica de los trabajos relacionados con el tema de estudio. Se ha realizado una exhaustiva búsqueda sobre las propiedades de los áridos reciclados, así como, de las propiedades de los hormigones fabricados con estos; los problemas de durabilidad de los hormigones expuestos a ambientes agresivos como el marinos y sobre la influencia de la utilización de agua de mar en la fabricación de hormigones. También se han consultado artículos científicos y las correspondientes normativas de los ensayos a los que serán sometidas las probetas que se fabricarán.

En segundo lugar, se ha realizado la fase experimental, en la cual se han analizado las propiedades de los áridos reciclados y las propiedades de todos los hormigones fabricados. Utilizando en todos los ensayos y para todos los hormigones variaciones de tipos de cemento, diferentes porcentajes de sustitución de áridos reciclados además de agua dulce y agua de mar para todos ellos.

El procedimiento final ha consistido en recopilar y ordenar todos los resultados de la fase experimental, se han analizado, se han procesado y expuesto en acorde con los objetivos del presente estudio.

1.4. ESTRUCTURA DE LA TESINA

Respecto a la estructura de la presente tesina, ésta se ha organizado alrededor de cinco capítulos, los cuales permiten seguir los procesos de análisis seguidos durante toda la investigación y llegar a emitir las pertinentes conclusiones.

En el primer capítulo se presenta la introducción del estudio, en el cual se intenta dar una visión general del estudio realizado, los objetivos que se quieren alcanzar y la metodología seguida para conseguirlo.

En segundo lugar, el estado del arte pretende contextualizar la temática de la presente tesina con los estudios realizados hasta la fecha. Trata de exponer la situación actual de las investigaciones que tengan una relación con el tema de estudio, ya sea para la utilización de agua de mar como la utilización de los áridos reciclados mixtos en hormigones. Además se ha considerado la realización de una síntesis de todas las normativas relativas a su posible utilización

Posteriormente a este procedimiento se inicia la fase experimental, en la cual se han caracterizado todos los materiales a utilizar y se explican los ensayos realizados.

A continuación se realiza el análisis de resultados, donde se exponen todos los resultados obtenidos en los diferentes ensayos para cada hormigón. Concretamente se ha analizado el tiempo de fraguado del hormigón, las propiedades físicas y mecánicas y los efectos de las retracciones, comparando los resultados entre los diferentes hormigones fabricados con distintos tipos de cemento, agua y áridos.

Finalmente, se han realizado las conclusiones, las cuales se han intentado sintetizar de manera esquemática y ordenada todos los resultados obtenidos en el procedimiento anterior.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se pretende resumir el estado actual de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición, y el uso del agua de mar en la fabricación de hormigón en masa.

Se entiende como árido reciclado el árido obtenido mediante el procesamiento de materiales inorgánicos utilizados previamente como materiales de construcción. La materia prima por tanto, serán los residuos de construcción y demolición. En función de la naturaleza de su origen, los áridos reciclados se pueden clasificar en:

- *Áridos reciclados procedentes de hormigón*
- *Áridos reciclados cerámicos*
- *Áridos reciclados mixtos.*

Este estudio se centra concretamente en los áridos reciclados mixtos, que son aquellos que contienen un porcentaje de hormigón y otro de materiales pétreos reciclados de diferente naturaleza que el hormigón.

La generación de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), constituye también un problema económico y ambiental, agudizado por su bajo porcentaje de reciclaje, lejos de los objetivos definidos por la CE para el 2020. Se estima que se generan 180 millones de toneladas/año de RCD en la Comunidad Europea [1,2], de los cuales 38 millones corresponden a España [3], donde aproximadamente un 75% corresponden a mezcla de elementos cerámicos (ladrillos, tejas, baldosas...) y hormigón [4,5]. Los índices de aprovechamiento de estos residuos en la producción de AR para la construcción se sitúan entre el 10-20% [3], cifra muy pequeña comparada con Holanda (90%) o Dinamarca (75%). La mayor parte del AR se destina a aplicaciones de bajo valor añadido, tales como rellenos o pistas provisionales en obras constructivas para el paso de vehículos [6]. La mayor parte de las aplicaciones de valor añadido vienen de los AR procedentes de hormigón, normalmente en fracción gruesa. Los áridos reciclados mixtos (ARM) quedan excluidos por la propia normativa cuando se trata de usos más exigentes [6].

En cuanto al agua de mar, esta contiene unos 35.000 ppm de sales disueltas, de las cuales alrededor del 78,0 % es cloruro de sodio y el 15,0 % es cloruro de magnesio y sulfato de sodio. Aunque, generalmente, esta agua no es utilizada en la fabricación de hormigones, se puede asegurar que su utilización es adecuada para la fabricación de hormigones en masa, pero no para ser utilizada en el cemento armado y pretensado, debido de al alto riesgo de corrosión de las armaduras.

Todo este contenido se ha organizado en dos grandes bloques, un relativo a los áridos reciclados mixtos y el otro, a los hormigones en ambiente marino

Se presentarán por tanto las diferentes normativas internacionales, y se compararán las diferentes especificaciones con la normativa española (EHE), la cual ha introducido recientemente un apartado exclusivamente dedicado a los áridos reciclados, el Anejo 15 [7].

También se analizarán las características propias del árido reciclado mixto y su efecto sobre el conjunto del hormigón. Además se expondrán las prescripciones, particularidades y limitaciones a posibles adiciones que debe cumplir un hormigón con estas características como puede ser la utilización de superplastificante para mejorar su trabajabilidad.

Posteriormente se pretende conocer la respuesta del hormigón frente a un ambiente agresivo como es el marino, así como la influencia del agua de mar como componente principal del hormigón y las diferentes clases de exposición a los que estará expuesto.

2.2. ÁRIDOS RECICLADOS MIXTOS

2.2.1 NORMATIVA Y LEGISLACIÓN

El Real Decreto 105/2008 regula la producción y gestión de los RCD. El objetivo es llegar a un desarrollo sostenible, para ello se basa en la prevención, reutilización, reciclado y formas de valoración. Prohíbe el vertido de los RCD sin previo tratamiento para así impulsar el reciclaje y revalorizar los materiales que llegan a las plantas de tratamiento.

Según el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) [4] se define como RCD todo residuo generado en una obra de construcción y demolición. Este plan aprobado por el Ministerio de Medio Ambiente en 2008 y con vigencia hasta 2015 fija varios objetivos para la reutilización de los RCD. Para 2010 se gestionarán correctamente el 100% de todos los materiales peligrosos contenidos en los RCD. España está situada en la retaguardia en cuanto al porcentaje de reciclaje respecto a otros países de la Comunidad Europea. Con objetivo de aumentar este porcentaje de reutilización, el Plan establece el objetivo de llegar a un 25% en 2012 y a un 35% en 2015. Por último se fija en operaciones de recuperación, incluido el rellenado, un objetivo del 15% para 2012 y del 20% para 2015.

Gracias al Plan Nacional Integrado de Residuos se ha impulsado la introducción del árido reciclado en parte del articulado que conforma la versión actual del PG-3[8]. En concreto la Orden FOM/891/2004, de 1 de marzo, por lo que se actualiza determinados artículos del Pliego de Preinscripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, relativos a firmes y pavimentos. Estas actualizaciones del PG-3 permiten el uso de materiales secundarios en algunas aplicaciones, pero sin desarrollar ninguna condición específica para el material. En estos casos se somete su aprobación básicamente a que el material propuesto cumpla lo exigido al material habitual y que sus características físico-químicas aseguren la estabilidad futura del conjunto.

En relación a la utilización del árido reciclado mixto en la fabricación de hormigón, una de las directrices más claras de la instrucción EHE-08 es la ejecución del árido reciclado procedente de cerámicos y mixtos para la fabricación de hormigón estructural. No obstante, la nueva EHE-08 incluye un Anejo específico referente al hormigón reciclado (Anejo nº 18), en el cual se definen los hormigones no estructurales como aquellos hormigones que no aporten responsabilidad estructural a la construcción, pero que colaboran a mejorar las condiciones duraderas del hormigón estructural o, que aporten el volumen necesario de un material resistente para conformar la geometría requerida para una finalidad determinada. Además, se puede utilizar un 100% de sustitución de los áridos gruesos.

En el Anejo nº 15 “Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados” se establecen las siguientes especificaciones:

Tabla 2.1. Especificaciones para la utilización de áridos reciclados EHE-08 Anejo 15

Especificaciones	Valor
% retenido en el tamiz #5	98,0 %
Medida mínima permitida	4,0 mm
Desclasificados	≤ 10,0 %
Uso del 100,0 % de los áridos reciclados	argila ≤ 0,25 %
Absorción en la utilización de más del 20,0% de árido	≤ 5,0 %
Absorción en la utilización de menos del 20,0% del árido	≤ 7,0 %
Material cerámico	≤ 5,0 % en pes
Partículas ligeras	≤ 1,0 % en pes
Asfalto	≤ 1,0 % en pes
Otros materiales	≤ 1,0 % en pes
Materia orgánica	sin

Así mismo, en el artículo 28 “áridos” se establecen unas especificaciones que se deben cumplir conjuntamente con el anejo nº 15 de la EHE.

Tabla 2.2. Especificaciones para la utilización de áridos reciclados EHE-08 artículo 28

Especificaciones	Valor
% pasa por el tamiz #4	≤ 5,0 %
% pasa por el tamiz #0,063 mm	≤ 5,0 %
Cloruros	≤ 0,05 %
Sulfatos	≤ 1,0 % del peso total
índice de lajas	≤ 35,0 %
Ensayo de Los Ángeles	40-50

Tanto el pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3) [8] como la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) presentan importantes limitaciones en el uso de áridos reciclados, permitiendo únicamente la utilización de áridos gruesos procedentes de hormigón seleccionado. Contempla únicamente la utilización de árido grueso

reciclado procedente del machaqueo de residuos de hormigón, y limita al 20% su utilización para estructuras. Para uso no estructural podrá emplearse un 100% de árido grueso reciclado, siempre que éste cumpla las especificaciones definidas en el Anejo nº15 [7], quedando excluido así el árido mixto.

No obstante, existen algunas investigaciones como el proyecto CLEAM [10] que propone una modificación en los requisitos que establece la EHE-08 en su anexo nº15, permitiendo la utilización de áridos reciclados mixtos con la consecuente modificación de algunas limitaciones, asemejándose a otras normativas internacionales.

2.2.2 PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS

Tal y como ya se ha explicado antes, se distinguen tres tipos de áridos reciclados según su origen y composición. A continuación se mostraran las particulares especificaciones para cada uno de ellos.

- Árido reciclado de hormigón

Árido que se obtiene de machacar, cribar y procesar los residuos de hormigón de cemento con Clinker Portland y áridos naturales en plantas de reciclaje. Las diferencias de composición pueden ser notables en función de la proporción de mortero presente en el residuo. En general, los áridos gruesos reciclados procedentes de hormigón, pueden ser utilizados tanto para hormigón en masa como para hormigón armado, manteniéndose los criterios de dosificación de los hormigones convencionales. La normativa holandesa contempla un contenido del 80% de hormigón procesado y que tenga una densidad superior a 2100 Kg/m^3 [9,10].

- Árido reciclado cerámico

Árido que se obtiene de procesar residuos con presencia predominante de material cerámico. Según la normativa holandesa el 85% de este árido debe tener una densidad superior a 1600 Kg/m^3 para evitar materiales excesivamente porosos y ligeros [10,11].

- Árido reciclado mixto

Definido en la norma holandesa como un árido que deberá contener un porcentaje mayor del 50% de hormigón con una densidad seca superior a 2100 kg/m^3 y no más del 50% de materiales pétreos reciclados de distinta naturaleza que el hormigón, incluyendo los cerámicos con una densidad seca mayor de 1600 kg/m^3 [10,11].

2.2.2.1 NORMATIVA TÉCNICA

Tal y como ya se ha explicado anteriormente la normativa española no permiten el uso de árido reciclado cerámico ni árido reciclado mixto en la fabricación de hormigón estructural. Otras en cambio, como la holandesa, toleran el uso de árido reciclado cerámico en hormigones no estructurales.

A continuación en la siguiente tabla se expondrá una comparativa entre normativas internacionales [12,18]. Cabe destacar que la normativa española, aún en fase de crecimiento, trata los valores del árido reciclado como uno solo, no hace referencia a los distintos tipos de áridos reciclados a diferencia de las otras normativas.

En la normativa RILEM [13] y en las especificaciones belgas [14] se establece una clasificación en 2 subgrupos según su origen: de fábrica de ladrillo y de escombros de hormigón.

En Japón se generan dos subgrupos del RCD similares; uso para obra civil y uso para edificación.

La norma inglesa [15] establece la clasificación del árido según su origen, distinguiendo entre árido procedente de hormigón y árido reciclado procedente de materiales cerámicos o mezcla de ambos.

La norma alemana divide los áridos reciclados en 4 grupos dependiendo también de su composición:

- **Tipo1:** Residuos de hormigón ($\geq 90\%$) con un contenido máximo de Clinker, cerámica y gres calcáreo del 10%.
- **Tipo 2:** Residuos de hormigón ($\geq 70\%$) con un contenido máximo de Clinker, cerámica y gres calcáreo del 30%.
- **Tipo 3:** Residuos cerámicos ($\geq 80\%$) con un contenido máximo de hormigón o áridos minerales del 20%.
- **Tipo 4:** Áridos procedentes de la mezcla de RCD con un contenido mínimo del 80% de material procedente de hormigón, áridos minerales o productos cerámicos.

Tabla 2.3.Comparativa entre normas europeas referentes al árido reciclado

Requisitos	RILEM			Japón			Bélgica		Hong Kong	Alemania				Reino Unido		Australia	Brasil	España EHE-08
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	GBSB I	GBSB II		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	RCA	RA			
Densidad seca (kg/m ³)	≥1500	≥2000	≥2400	≥2200	≥2200	≥2200	≥1600	≥2100	≥2200	≥2200	≥2200	≥1800	≥1500	-	-	≥2100	-	-
Absorción (%)	≤20	≤10	≤3	≤3	≤5	≤7	≤18	≤9	≤10	≤10	≤15	≤20	-	-	-	≤10	≤12	≤7
Contenido de material de densidad <2200kg/m ³ (%)	-	≤10	≤10	-	-	-	-	≤10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Contenido de material de densidad <1800kg/m ³ (%)	≤10	≤1	≤1	-	-	-	≤10	≤1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Contenido de material de densidad <1000kg/m ³ (%)	≤1	≤0,5	≤0,5	-	-	-	≤1	≤0,5	≤40	-	-	-	-	≤1	≤1	-	-	≤1
Contenido de materiales externos (metales, vidrios) (%)	≤5	≤1	≤1	Requisitos según tabla 2			≤1	≤1	≤0,6	Requisitos según tabla 3				≤5	≤1	≤2	≤3	≤1
Índice de lajas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Índice de trituración	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≤30	-	-
Contenido de metales (%)	≤1	≤1	≤1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Contenido de materia orgánica (%)	≤1	≤0,5	≤0,5	-	-	-	≤0,5	≤0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Contenido de finos (<0,063mm) (%)	≤3	≤2	≤2	-	-	-	≤5	≤3	≤4	≤4	≤4	≤4	≤4	≤5	≤3	-	-	-
Pérdida por limpieza (%)	-	-	-	≤1	≤1	≤1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≤1	-	-
Resistencia a las heladas (%)	-	-	-	≤12	≤12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Contenido de arenas (<4mm) (%)	≤5	≤5	≤5	-	-	-	-	-	≤5	-	-	-	-	-	-	-	-	≤5
Contenido de sulfatos (SO ₃) (%)	≤1	≤1	≤1	-	-	-	≤1	≤1	≤1	-	-	-	-	≤1	≤1	-	≤1	≤0,8
Contenido de cloruros (%)	-	-	-	-	-	-	≤0,06	≤0,06	≤0,05	≤0,04	≤0,04	≤0,15	≤0,15	-	-	-	≤1	≤0,05
Contenido de asfalto (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≤1	≤1	-	≤5	≤10	-	-	≤1
Contenido de material cerámico (%)	≤100	-	-	-	-	-	≤100	-	-	-	≤30	≥80	-	≤100	≤100	-	-	≤5
Desclasificados inferiores (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≤10

2.2.2.2 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS

- *Granulometría*

La importancia de la distribución granulométrica de los áridos radica en que, como en el caso de los áridos naturales, afecta directamente a las propiedades del hormigón. Distribuciones continuas de la granulometría del árido provocan grados de compacidad y de resistencia más elevados, debido a que la interacción entre partículas se ve favorecida en granulometrías continuas. Otras propiedades que también se pueden ver afectadas por la granulometría pueden ser: la trabajabilidad, la porosidad, la permeabilidad y la durabilidad del mismo.

Según el tipo de triturado empleado, en el proceso de reciclaje del árido, obtendremos una granulometría determinada. Es decir, de forma genérica podemos generar un volumen importante de una fracción en planta, aunque esto no evita el generar por defecto otras fracciones. En general el modulo granulométrico de los RCD procedentes de hormigón de mayor resistencia conllevan módulos granulométricos mayores. Este último es mayor a menor número de trituraciones y menor a mayor número de estas.

El árido grueso que se produce actualmente está entre el 70 y el 90% del árido total producido. Esta fracción gruesa cumple adecuadamente lo exigido por las normas ASTM o PREN de carácter internacional.

En la normativa técnica española, la EHE-08 Anejo 15, las especificaciones impuestas a las gravas, arenas o finos para su utilización en hormigones determinan:

- El árido reciclado puede emplearse tanto para hormigón en masa como hormigón armado de resistencia característica no superior a 40 N/mm², quedando excluido su empleo en hormigón pretensado.
- Para poder tener una clasificación uniforme de todos los tamaños es necesario una relación del tamaño máximo y mínimo del árido (D/d) superior a 1,4.
- El tamaño mínimo permitido de árido reciclado es de 4 mm
- Los áridos reciclados deberán presentar un contenido de desclasificados inferiores menor o igual al 10% y un contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm no superior al 5%.

- *Densidad y absorción*

La densidad del árido reciclado suele oscilar entre 2100,0 i 2400,0 kg/m³, mientras que la densidad saturada con superficie seca varía entre 2.300,0 i 2.500,0 kg/m³, de manera que en todos los casos se pueden considerar estos áridos de densidad normal, no ligeros, por presentar una densidad superior a 2.000 kg/m³, según establece la norma UNE 146.120:97 "Áridos per a hormigones. Especificaciones".

La absorción es una de las propiedades físicas del árido reciclado que presenta una mayor diferencia con respecto al árido natural, debido a la elevada absorción de la pasta que queda adherida a él. Los valores habituales de absorción están comprendidos entre 4-10%, incumpliendo en la mayoría de los casos el límite del 7% que establece la EHE-08.

Tanto las propiedades de densidad como de absorción de los áridos reciclados se ven muy diferenciadas con las propiedades del árido natural. Los principales factores que afectan a estas diferencias son:

Tamaño de partícula:

Las fracciones más pequeñas presentan menor densidad y una mayor absorción (para un mismo hormigón de origen) que las fracciones más gruesas debido a que en las primeras se concentra un mayor porcentaje de pasta.

Calidad del hormigón original:

Los hormigones de baja relación a/c (y por lo tanto de elevada resistencia), suelen dar lugar a áridos reciclados de mayor calidad, y por lo tanto con mayor densidad y menor absorción. Estudios realizados demuestran que una misma planta que procese hormigones de diferente calidad (10-50 N/mm²) puede producir áridos con un rango del coeficiente de absorción muy amplio.

Cuando en el procesado del árido grueso reciclado se realizan sucesivas etapas de trituración, se elimina un mayor contenido de mortero y la calidad del árido mejora sustancialmente, observándose un descenso de la absorción y un incremento de la densidad.

- *Contenido de finos y arenas*

El árido reciclado genera finos durante su manipulación a causa de la aparición de pequeñas partículas que se desprenden. Según algunos ensayos españoles la generación de finos sobre fracciones gruesas ya clasificadas en el laboratorio puede variar entre 0,27% i 1,14%, situándose, en la mayoría de los casos, por debajo del límite del 1,5% del árido grueso establecido por la EHE.

La presencia de partículas finas a la superficie del árido reciclado puede originar problemas de adherencia entre éste y la pasta de cemento, además de provocar un aumento de la cantidad de agua de pastado necesaria.

Las recomendaciones o normas que incluyen especificaciones sobre esta propiedad (norma belga, inglesa, RILEM y alemana) establecen un límite más alto de finos por el árido reciclado grueso, admitiendo entre un 2,0% i un 5,0%, favoreciendo así el cumplimiento de esta especificación.

Por otra parte, después de obtener la fracción gruesa en el árido reciclado, éste sigue presentando pequeños porcentajes de arena (partículas menores de 4,0mm) debido a la disgregación que padece el árido al manipularse. Los valores más frecuentes oscilan entre 0,5-2,0%.

La Instrucción EHE admite para el árido convencional hasta un 10,0% de desclasificados inferiores, entre los que se pueden contar también estas partículas de arena generadas en la manipulación del árido reciclado. El porcentaje de desclasificación admisible en el árido reciclado ha de ser inferior debido al efecto perjudicial que ocasiona en las propiedades del hormigón.

El uso de las fracciones finas del árido reciclado de hormigón implica, entre otros inconvenientes, un aumento muy notable de la retracción por secado y de la fluencia debido a la mayor cantidad de agua que precisan en su dosificación. Por ello, en Europa sólo se permite el uso de las fracciones gruesas que reducen notablemente las diferencias con respecto a un hormigón con áridos convencionales. En la mayoría de los casos el árido fino generado únicamente por la manipulación de la fracción gruesa de árido reciclado ya clasificado se sitúa en la mayoría de los casos por debajo del límite que marca la EHE-08 de un 1%.

En el caso de partículas de tamaño inferior a 4mm las diferentes normativas, incluida la EHE-08 en su anejo 15, indican que únicamente se permite el uso de fracción gruesa para la fabricación de hormigones con árido reciclado. Esto es debido al efecto negativo que provocan en las propiedades del hormigón.

- *Contenido de impurezas*

Los áridos reciclados pueden incorporar impurezas y contaminantes que influyen negativamente en las propiedades del hormigón. Estas impurezas producen en todos los casos un descenso de resistencia en el hormigón. Además, y dependiendo del tipo de impureza, se pueden presentar otros problemas como reacciones álcali-árido (vidrio), ataque por sulfatos (yeso), desconchados superficiales (madera o papel), elevada retracción (tierras arcillosas) o mal comportamiento hielo-deshielo (algunos cerámicos). En la EHE-08 Anejo 15 Capítulo VI Artículo 28, determina unos límites para cada contenido según la Tabla.

Tabla 2.4. Impurezas máximas en el árido reciclado (EHE-08)

Elementos	Max. Contenido de impurezas % del peso total de la muestra
Material cerámico	5
Partículas ligeras	1
Asfalto	1
Otros materiales (vidrio, plásticos, metales,etc.).	1

2.2.3 PROPIEDADES DE LOS HORMIGONES CON ÁRIDOS RECICLADOS

Una de las aplicaciones del árido reciclado mixto es la fabricación de hormigones y morteros que dada la reducida densidad del escombros triturado, estaría en la condición de árido ligero, por lo que puede ser de aplicación para la obtención de hormigones ligeros sin finos.

El hormigón no ligero fabricado con ladrillo triturado suficientemente denso, se puede utilizar en la construcción de estructuras de hormigón en masa y hormigón armado, tales como: muros de sótano, pilas de hormigón, chimeneas, todo tipo de productos de hormigón armado prefabricado, elementos para tejados, bloques de hormigón o tejas de hormigón para tejados. La resistencia de este tipo de hormigón reciclado disminuye considerablemente en relación con la del hormigón normal.

La influencia de los áridos reciclados en las propiedades del hormigón endurecido (propiedades mecánicas) ha sido ampliamente estudiada. La baja resistencia de los hormigones con áridos reciclados está asociada principalmente al mortero adherido que incrementa la porosidad del hormigón [19, 20].

Además, los hormigones fabricados con áridos reciclados mixtos pueden tener menores resistencias debido a la inclusión de áridos débiles y porosos, como áridos de la trituración de materiales cerámicos. Sin embargo, los áridos reciclados mixtos con contenidos altos de piedra pueden tener mejores propiedades que las obtenidas por áridos reciclados de hormigón [21]. En general, la resistencia a flexión o tracción y el módulo elástico de los hormigones fabricados con áridos reciclados suelen ser proporcionales a la resistencia a compresión obtenida [22].

Los hormigones con AR sufren mayor retracción por secado que el hormigón convencional con la misma resistencia a compresión. No obstante, los fabricados con áridos reciclados cerámicos y mixtos apenas sufren retracción [23, 24], mejorando así una de las propiedades más difíciles de controlar debido a su capacidad de curado interno [25,26]. Este efecto negativo de la presencia de AR puede ser mitigado con la incorporación de cierta cantidad de adiciones minerales [27]. Kou et al. [28,29] encontraron que cuando la ceniza volante tipo F era utilizada como adición o sustitución al cemento, se podían mejorar tanto las propiedades mecánicas como de durabilidad del hormigón con áridos reciclados.

Uno de los requisitos que establecen las normas para los áridos utilizados en la fabricación de hormigón es el contenido de sulfatos, ya que su ataque puede provocar reacciones expansivas

y conducir a la fallida de las probetas de hormigón. El contenido de sulfatos de los áridos reciclados proviene mayoritariamente del yeso y es una de las propiedades críticas del áridos reciclados mixtos. No obstante, las pocas investigaciones realizadas en este campo [30, 31] no han visto después de más de un año de exposición agresiva ningún daño importante y siempre las expansiones sufridas han estado por debajo de los valores límites pudiendo ser controladas con cemento bajo en aluminatos.

De acuerdo al análisis de las propiedades básicas de los hormigones fabricados con AR en la planta de reciclaje del puerto de Barcelona utilizando agua dulce y agua de mar [32,33], se determina que el agua de mar acelera el fraguado, que tanto los hormigones convencionales como los hormigones reciclados fabricados con diferentes porcentajes de AR alcanzan la resistencia a compresión mínima exigida de 30 MPa por el Pliego de Preinscripciones Técnicas del Puerto de Barcelona, tanto con CEM III, CEM I SR, agua de mar y agua dulce.

Las propiedades mecánicas, como son la resistencia compresión, a tracción y el módulo elástico, disminuyen con el aumento del porcentaje de áridos reciclados en su fabricación, pero pueden aumentar ligeramente con el uso de agua de mar, y a la vez con la utilización del cemento portland de tipo CEM III.

Un hormigón fabricado con 100% de AR, con CEM III y agua de mar consigue que la penetración de los iones de Cl sea baja, según la calificación de la norma ASTM-1202. A la vez que se consigue una calidad “excelente”, mediante la velocidad de impulsos de ultrasonidos según la norma UNE-EN 12504-4:2006. Sin embargo la determinación de la succión capilar y la resistividad eléctrica con hormigones que incorporan AR y agua de mar en comparación de un hormigón convencional no se han obtenidos resultados relevantes.

2.2.3.1 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

La resistencia de los hormigones reciclados, es menor que la convencional, tanto menor como su contenido de cerámicos e impurezas, debido a su dureza y porosidad. En el caso de los Mixtos puede no ser tan menor debido a su alto contenido en rocas y áridos procedentes de hormigón [22]. Esto es debido a la débil interfase entre áridos reciclados y morteros, se generan hormigones de resistencias más bajas. Este descenso de resistencia respecto un hormigón convencional se genera por el aumento de la porosidad que provoca el mortero adherido [34].

Una de las propiedades más difíciles de controlar en hormigones fabricados con árido reciclado es la retracción, la cual se analizará extensamente más adelante. Los hormigones con árido reciclado sufren mayor retracción por secado que el hormigón convencional con la misma resistencia a compresión. Esto se debe principalmente a que los áridos reciclados presentan un menor impedimento al movimiento (menor módulo elástico) y porque a mayor contenido de cemento que generalmente es utilizado para obtener las resistencias necesarias. Sin embargo, hasta el 20% de árido reciclado en sustitución por peso del árido natural, la retracción del hormigón con árido reciclado y el hormigón convencional son iguales [35].

La permeabilidad de los hormigones reciclados depende notablemente del tipo de fluido al que se sometan. La pasta de cemento es la responsable de esta característica, la capilaridad

que permite el paso de los gases se ve, en gran medida, afectada por el ambiente de curado siendo más cerrada en el caso del ambiente de curado ideal y en matrices de hormigón que incorporan árido reciclado. En el caso de la capilaridad que hace de mecanismo de transporte para agua, la diferencia que arrojan los dos tipos de ambientes no es tan relevante [36].

El ataque por sulfatos en las probetas de hormigón puede provocar reacciones expansivas y conducir a la falla de las mismas. El contenido de sulfatos es un indicador riguroso del correcto porcentaje de sustitución en los hormigones de carácter no estructural [35].

El contenido de sulfatos de los áridos reciclados proviene mayoritariamente del yeso, y es una de las propiedades críticas del árido reciclado mixto. Por esto, se recomienda a la planta acopiar por separado partidas que incluyan un elevado contenido de placas de yeso. Además, mediante la eliminación de la fracción más fina (menor de 4 mm) y la incorporación de sistemas de separación de materiales ligeros se puede reducir también su contenido [36].

2.2.3.2. APLICACIONES

El uso de hormigones con árido reciclado mixto ha sido ampliamente estudiado para ser utilizado como elemento no estructural [35,38].

La EHE-08 en su anejo no 18 define hormigón de uso no estructural, como aquellos hormigones que no aportan responsabilidad estructural a la construcción pero que colaboran en mejorar las condiciones durables del hormigón estructural o que aportan el volumen necesario de un material resistente para conformar la geometría requerida para un fin determinado [7].

La norma establece que como resistencia característica mínima de los hormigones para esta aplicación sea de 15 N/mm². Debido a la baja resistencia que requieren estos hormigones entre sus requisitos la EHE-08 no consigna en su designación ningún tipo de referencia al ambiente.

A la hora de estudiar la cantidad de árido reciclado que podemos substituir para la fabricación de hormigones no estructurales, el contenido de sulfatos será muy restrictivo, como ya hemos mencionado anteriormente [22].

Algunos estudios analizan la posibilidad de utilizar este tipo de hormigones con fines distintos a los no estructurales. [38-40]. Incluso se han llevado a cabo estudios piloto que contemplan la posibilidad de utilizar RCD junto a adiciones (cenizas volantes, humo de sílice...) [39].

El proyecto CLEAM recomienda limitar el uso de hormigones reciclados con áridos mixtos a hormigones en masa y en el caso de utilizar algún tipo de armadura, se debería limitar su uso a una clase de exposición I (no agresiva) [41].

2.2.3.3 DURABILIDAD DE LOS HORMIGONES CON ÁRIDOS RECICLADOS

En general el uso de árido reciclado aumenta la absorción, la retracción por secado y la fluencia y disminuye la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad en comparación con los hormigones compuestos por áridos naturales [12,43-45]. Las grietas y fisuras que se crean en el empleo de árido reciclado, hacen que el hormigón sea más susceptible a la

penetración de fluidos [42]. Esto también puede ser debido a la edad del mortero adherido [45]. Estos inconvenientes limitan la utilización de áridos reciclados con porcentajes más altos al 30% en hormigón estructural.

Otro estudio [42] demostró que, en edades de curado de 3, 7, 28 y 56 días, en comparación con hormigón con árido natural, la absorción del hormigón con áridos reciclados se incrementó en un 47,3%, 43,6%, 38,5% y 28,8%, respectivamente, aunque los procesos de absorción de agua en ambos tipos de hormigón fueron similares y obedecieron a la misma ley.

El hormigón con árido reciclado posee altos valores característicos de permeabilidad en comparación con los de hormigón convencional. Estos valores se pueden reducir con la disminución de la relación agua-cemento, tanto para el hormigón con árido reciclado como para el hormigón convencional [46].

2.2.3.4 RETRACCIONES

La retracción es una propiedad reológica del hormigón que se traduce en una disminución, de carácter atensional, de las dimensiones de un elemento en el tiempo. Su efecto se manifiesta a través de varios mecanismos, pudiendo distinguir entre varios tipos de retracción. Estos efectos pueden variar según la composición del hormigón y de las condiciones ambientales.

La retracción y la afluencia de hormigones han resultado ser temas de extenso debate debido a la mayor capacidad de absorción de los áridos reciclados y, por lo tanto a mayor pérdida de agua inicial y a mayor retracción, en comparación con los áridos convencionales. El posible uso de hormigones con áridos reciclados requiere de algunas consideraciones especiales respecto a esta propiedad.

Generalmente, la afluencia i retracción se incrementan a la vez que aumenta la sustitución del árido natural del hormigón [47].

En el hormigón endurecido la reducción del volumen experimentado se produce por la suma de la retracción térmica, retracción por secado y retracción autógena.

- *Retracciones plásticas:*

Este tipo de retracción se halla en el hormigón fresco. Las deformaciones que provocan son consecuencia de la pérdida de agua en el ambiente. En los hormigones convencionales la exudación de agua en la mezcla compensa esta pérdida de humedad y, si las temperaturas no son suficientemente altas y el curado es el idóneo, no provoca fisuras y/o deformaciones.

Según los autores José Mora-Ruacho, RavindraGettu y Antonio Aguado [48], el hormigón fresco expuesto a altas tasas de evaporación es propenso al agrietamiento y a fisuras por retracción plástica, especialmente en estructuras con grandes relaciones superficie/volumen. La investigación muestra que la reducción de la superficie de tensión del agua de mezcla es una forma eficaz para reducir tales fisuras. El estudio concluye mostrando la eficiencia de aditivos reductores de retracción en la reducción de los agrietamientos por retracción plástica.

- *Retracciones por secado:*

La necesidad de una trabajabilidad adecuada para facilitar la puesta en obra y consolidación del hormigón, necesita del uso de cantidades de agua en la mezcla superiores a las necesarias por el proceso de hidratación. La pérdida de parte de este exceso de agua en la matriz del hormigón se conoce como retracción por secado.

Se conoce que a bajas relaciones agua/cimiento, la retracción por secado es menor [49].

Algunas investigaciones [50] remarcan que con el uso de cenizas volantes, escorias de altos hornos o humo de sílice, la retracción por secado mejora, ya que se rellenan pequeños poros perjudiciales para la estructura del hormigón.

- *Retracciones autógenas:*

La reacción autógena es cualquier tipo de retracción independientemente de las pérdidas externas de agua, asociadas a una pérdida de peso o a cambios de temperatura.

En primer lugar, son consecuencia de reacciones químicas entre el cemento y el agua, que provocan un producto con un volumen menor que los reactivos, provocando una deformación en la pasta hidratada del cemento.

En segundo lugar, en hormigones con baja cantidad de agua y con microestructuras densas e impermeables, el agotamiento del agua libre debido a la hidratación del cemento produce humedades internas bajas, hasta un 70% en ambientes con humedad relativa del 100%, durante las primeras edades. Consecuentemente a estas humedades internas existe una posterior y significativa reducción del volumen en hormigones [51].

Al querer trabajar con relaciones de agua/cemento bajas, puede incurrir en el error de posible aumento de la retracción autógena [49] ya que no tiene agua suficiente como para completar la reacción con el cemento.

2.3 AMBIENTE MARINO

Las obras marítimas son consideradas las estructuras de obras portuarias o de costas en contacto con el mar. Estas estructuras pueden tener partes sumergidas, partes en zonas de oscilación de mareas y de salpicadura y otras partes que estén al aire libre, por consiguiente pueden estar en cualquiera de las clases generales de exposición que dicta la norma EHE-08[7].

2.3.1 CLASES DE EXPOSICIÓN SEGÚN NORMATIVA EHE-08

- I - No agresiva
- II- Normal (a, b, según humedad relativa). Dan lugar a corrosión de armaduras por despasivación debida a la carbonatación del hormigón.
- III Marina (a, b, c: aérea, sumergida, carrera de marea). Dan lugar a corrosión de armaduras, generalmente por picadura, debida a la presencia de cloruros marinos.
- IV Cloruros no marinos. Dan lugar a corrosión de armaduras.

- **Clases específicas de exposición (CE):**

- Q - Agresividad química (a, b, c: ataque al hormigón débil, medio, fuerte)
- H - Heladas sin sales fundentes (acción ciclos hielo-deshielo)
- F - Heladas con presencia de sales fundentes.
- E - Erosión.

El ambiente en que está situada cualquier estructura viene fijado por:

$$A = CG + \Sigma (CE_i)$$

Por lo tanto en nuestro caso, los bloques formarán parte del dique, con lo cual estarán en un ambiente marino en carrera de mareas tipo IIIc. Por otra parte, al estar en contacto con el agua de mar estarán dentro de una clase específica de exposición, que en el caso de nuestro litoral acostumbra a ser el Qb. Además, parte de la estructura estará azotada por el oleaje, entonces se deberá tener en cuenta la clase erosiva E.

En resumen, nuestra estructura según la norma EHE-08 se encontrará expuesta a un ambiente tipo IIIb + Qb + E.

Dependiendo de la clase de exposición a la que esté sometido el hormigón, la EHE-08 establece que para nuestro caso (IIIb + Qb + E) le corresponde una relación máxima de a/c de 0,5 y un contenido mínimo de cemento de 300 Kg/m³.

Tabla 2.5. Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento según clase de exposición. (EHE-08).

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	CLASE DE EXPOSICIÓN												
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Máxima relación A/c	Masa	0,65	-	-	-	-	-	-	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	Armado	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	Pretensado	0,60	0,60	0,55	0,50	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,50
Mínimo Contenido de cemento (kg/m ³)	Masa	200	-	-	-	-	-	-	275	300	325	275	300	275
	Armado	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300
	Pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300

2.3.2 EXIGENCIAS PARTICULARES PARA HORMIGONES EXPUESTOS AL AMBIENTE MARINO

Tolerancias a cumplir:

- Asiento en el cono de Abrams <7%.
- Consistencia plástica o blanda.
- Selección de componentes apropiados.
- Relación máxima agua/cemento: no superará el valor 0,5 excepto colocado con bomba (0,6)
- Contenido mínimo de cemento: 300 Kg/m³
- Resistividad eléctrica mínima: 15 KΩ·cm.
- Al estar sometido a erosión deberá cumplir el Artículo 37- EHE-tabla 37.3.7:

A) Función tamaño del árido:

Tabla 2.6. Contenido de cemento en función del diámetro del árido

Diámetro (mm)	Cemento Max. (Kg/m ³)	Cemento Min. (Kg/m ³)
10	400	300
20	375	300

B) Árido fino de dureza igual que el cuarzo.

C) Árido grueso con Coeficiente de los Ángeles igual a 30.

- Se realizarán ensayos característicos y de control según la EHE-08.
- Las probetas se moldearán, conservarán y romperán según los métodos de ensayo UNE-7240 y UNE-7242.
- Los ensayos sobre probetas curadas en laboratorio deben ser superiores al 90% de la resistencia característica, si no es así, se deberán hacer ensayos de información de acuerdo con el artículo 86.8 de EHE-08.

Consistencia del hormigón

- La determinación de la consistencia se efectuará según UNE 7103.

Normativa de obligado cumplimiento

-EHE-08

-Recomendaciones de Obras marítimas ROM 4.1.94 artículo 7.3.10

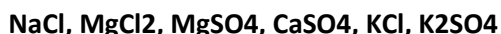
2.3.3. DURABILIDAD DE LOS HORMIGONES EN AMBIENTE MARINO

Se ha encontrado que la utilización de áridos reciclados procedentes de hormigón en la fabricación de hormigones reciclados, dosificados con la misma relación agua/cemento, no supone una pérdida de la durabilidad de los mismos [36].

Puede afirmarse que hormigones reciclados de aplicación estructural elaborados con iguales relaciones agua/cemento que sus hormigones de control, ofrecen una protección frente a la penetración de agentes externos, mayor que los hormigones tradicionales debido a las mejores características de la pasta de cemento. No obstante, al verse reducida la cantidad de agua efectiva, se hace necesario utilizar productos aditivos superplastificantes que mantengan la fluidez de la masa fresca [36].

2.3.3.1. ATAQUE POR CLORUROS:

El agua de mar está compuesta por diferentes sales disueltas como:



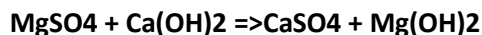
Además de las sales también hay otros componentes como el oxígeno y el anhídrido carbónico. Que pueden causar patologías en el hormigón, sobretodo en el hormigón armado. El ataque químico al hormigón se produce fundamentalmente en la zona baja de oscilación de mareas, en la parte sumergida del hormigón y en la que está en contacto con el terreno del fondo. La concentración de estas sales varía mucho de un mar a otro, en el litoral catalán se toma de referencia una concentración alrededor de 35 g/l.

La influencia de las adiciones puzolánicas en la penetración de cloruro expuesto a agua de mar puede ser atribuida a la finura de los poros de la pasta de cemento que reduce la porosidad interconectada y la permeabilidad de la estructura de hormigón. Además, las adiciones puzolánicas aumenta la resistividad eléctrica del hormigón y esto podría causar un retraso adicional en la difusión de todas las especies iónicas, incluyendo Cl^- , a través de los poros capilares de la pasta de cemento [51].

La sustitución parcial de portland de cemento con adiciones puzolánicas, tales como cenizas volantes o humo de sílice reduce aún más la difusión de cloruro a través del hormigón [51]. El remplazo de ceniza (hasta 50% en peso de aglutinante) y una baja relación a/c produce una resistencia al cloruro buena en hormigón bajo exposición a largo plazo en un entorno marino [52].

2.3.3.2 ATAQUE POR SULFATOS

El ataque tiene lugar por medio del sulfato de magnesio del agua de mar que mediante reacciones de sustitución del catión Mg^{2+} por el catión Ca^{2+} provocan la formación de sulfato cálcico.



El sulfato reacciona con el aluminato tricálcico y con el silicato de calcio hidratado dando lugar a la formación de etringita expansiva. Afortunadamente la expansión de la etringita no es tan enérgica al ser ésta soluble en el agua del mar, que es rica en cloruros. Por su parte, el hidróxido magnésico insoluble puede ayudar a proteger al hormigón bajo el mar, sin embargo en la zona elevada de las estructuras la acción de las olas hace que se pierda esta protección [55].

Conviene tener en cuenta también que en la zona de salpicadura las sales en disolución son absorbidas por el hormigón por capilaridad, produciéndose posteriormente la evaporación del agua y la concentración de estas sales que cristalizan dando lugar a presiones que llegan a disgregar al hormigón. La Instrucción EHE10 exige que se empleen en los hormigones en contacto con el agua de mar cementos resistentes al agua de mar (MR). En la realidad estos cementos se utilizan, pero también se emplean de forma indistinta los resistentes a los sulfatos (SR).

No obstante conviene indicar que, durante muchos años se han estado usando en muchos países, con gran éxito, cementos con adiciones puzolánicas a fin de reducir el contenido total de C3A.

Además de aditivos reductores de agua tales como superplastificantes, el uso de estas adiciones puzolánicas en forma de humo de sílice, cenizas volantes y/o escoria de alto horno puede reducir significativamente el ataque por sulfatos [51].

2.3.3.3 ATAQUE ÁLCALI-SÍLICE

Debido a la interacción entre ciertos áridos (que contienen sílice o cuarzo) y la solución altamente alcalina de la fase acuosa de los poros, el hormigón se puede deteriorar. Esta reacción se conoce como "reacción álcali-sílice" (ASR). El contenido en álcali de la fase acuosa de los poros depende principalmente del contenido de álcali de la fase de clinker, e incluso en la exposición al medio ambiente como sales de sodio en agua de mar.

Superplastificantes pueden mitigar el efecto perjudicial de la ASR de agregados álcalireactivos, en su caso, mediante la reducción de la permeabilidad del hormigón. En tal caso, la mejor forma de prevenir los daños a la ASR es el uso de materiales puzolánicos en combinación con un aditivo reductor de agua [51].

Por lo tanto, el uso de ambos superplastificantes y materiales puzolánicos es de nuevo la mejor manera de evitar ASR en un hormigón marino en caso de contener árido álcalireactivo [51].

Al curado del hormigón le presta una atención adecuada la Instrucción EHE [3] al fijarlo mediante una fórmula en la que se tiene en consideración: la clase de exposición ambiental del

hormigón, la temperatura ambiente, la velocidad de desarrollo de resistencias del hormigón, el tipo de cemento utilizado, el soleamiento....La fórmula de curado es la siguiente:

$$D = K \cdot L \cdot Do + D1$$

Siendo:

D: duración mínima de curado, en días.

K: coeficiente de ponderación ambiental que depende de la clase de exposición en la que esté el hormigón.

L: coeficiente de ponderación térmica que depende de la temperatura media durante el curado.

Do: parámetro básico de curado que depende de la velocidad de desarrollo de resistencias del hormigón, exposición al sol, viento y humedad relativa.

D1: parámetro dependiente del tipo de cemento utilizado y, en su caso, también del contenido de adición de que lleve el hormigón.

Teniendo en cuenta todos estos parámetros nos encontramos que puede haber tiempos de curado que de acuerdo con las condiciones extremas de nuestro país, pueden oscilar entre 0,5 y 15 días. En todo el proceso de ataque sobre el hormigón, bien sea por acciones químicas o físicas, tiene una importancia muy grande la porosidad del hormigón dado que la mayor parte de estas acciones se producen mediante transporte de los agentes agresivos en agua, o por efecto de difusión a través de la red capilar intercomunicada del hormigón. En este sentido la calidad de la superficie externa del hormigón, su piel, juega un papel muy importante en la durabilidad del mismo.

En algunas estructuras situadas en contacto con agua de mar el crecimiento de moluscos y de algas suele dar problemas adicionales al hormigón no sólo desde el punto de vista de agresión química sino también mecánico. En ocasiones, la gran cantidad de algas que se forman alrededor de una pila puede hacer que el empuje de las olas sobre ella se multiplique por dos. Tanto los moluscos como las algas tienden a desarrollarse con más intensidad cuando la estructura esta próxima a desagües de aguas residuales ricas en materia orgánica y cuando la temperatura del agua es alta como en los trópicos. El ataque de las algas se produce fundamentalmente a través de ácidos orgánicos y sulfatos.

2.3.4 APLICACIONES PORTUÁRIAS

A continuación se muestran los diferentes usos de los áridos reciclados en las zonas portuarias, los cuales se han incrementado debido a la necesidad de reutilización de los mismos y gracias a las investigaciones que se están llevando a cabo. El estudio se centrará en su posible aplicabilidad en bloques de hormigón, partiendo del estudio detallado del Pliego de Preinscripciones Técnicas del Puerto de Barcelona.

Nivelación de terrenos:

En ocasiones, con el objetivo de nivelar el terreno y para mejorar su capacidad de drenaje, es habitual extender una capa de 20-30 cm de áridos reciclados de granulometría 20/70. Este caso se da a la hora de ejecutar zonas de aparcamiento, o zonas de acopio.

Relleno de cunetas:

Para mejorar la capacidad de cunetas fácilmente colmatables, se puede rellenar ésta con materia granular para que actúe a forma de dren. Estos materiales granulares pueden ser gravas de cantera o áridos procedentes de RCDs de granulometría 20/50 o 20/70.

Relleno de celdas de cajones para diques verticales:

En la formación de diques verticales una vez se ha llevado el cajón de hormigón a su posición definitiva se debe rellenar. Este relleno puede ser con hormigón, materiales granulares... Se recomienda, para poder asegurar su eventual reflotamiento del cajón, que el relleno se realice con material granular fino. Esto facilita que en caso de querer reflotarlo podamos vaciarlo haciendo unos taladros e inyectando agua a presión. Estos finos pueden ser perfectamente áridos reciclados procedentes de RCDs de granulometría 0-20.

Accesos a precargas:

Durante el tiempo de permanencia de la precarga, la coronación de esta tiene que ser accesible por parte del personal que controla la instrumentación, por lo que se tienen que construir rampas de acceso.

Es habitual que estas rampas provisionales se ejecuten mediante la aportación de áridos reciclados procedentes de RCDs para aumentar su resistencia y su capacidad de drenaje.

Ejecución de capas drenantes:

Tras la ejecución de los rellenos hidráulicos y con anterioridad a la ejecución de las precargas se dispone sobre el relleno una capa drenante. Esta capa tiene un espesor de 50 cm y se sitúa entre dos geotéxtiles para evitar que se colmate. La capa se acostumbra a ejecutar con gravas de cantera, aunque en ocasiones puede ser recomendable el uso de áridos reciclados procedentes de RCDs de granulometría 20/70.

Saneos:

Para corregir las zonas blandas de los rellenos hidráulicos, normalmente relacionadas con la acción del agua, se lleva a cabo un saneo. Este saneo consiste en realizar una excavación para reemplazar el material blando por materiales que garanticen un aumento de resistencia y drenaje. Estos materiales pueden ser en ocasiones escollera, todo uno de cantera, o áridos reciclados de granulometría 20/70 o 100/300.

Caminos provisionales:

La ejecución y mantenimiento de los caminos provisionales se lleva a cabo normalmente con áridos reciclados procedentes de RCDs, tanto en su base con material de granulometría 20/70, como en la coronación, con un 0-20. El buen comportamiento de estos materiales ante un tráfico tan exigente, no pasa desapercibido y renueva la confianza en estos materiales para seguir avanzando hacia la normalización de su uso.

Bloques de hormigón:

Uno de los factores determinantes del diseño de los diques rompeolas es el relativo al tipo y peso de las piezas del manto principal, que con un talud determinado, son capaces de resistir las solicitaciones debidas al oleaje.

Los diques de piezas sueltas o diques rompeolas son las obras más comúnmente usadas para la protección de áreas costeras o puertos contra la acción del oleaje. Estas estructuras disipan la energía del oleaje por los procesos de: 1) rotura, 2) fricción sobre y en el interior del macizo granular y 3) transmisión de oleaje hacia la parte abrigada.

La misión de los diques de escollera es la creación de un área abrigada frente a la acción del oleaje. Desde un punto de vista funcional, la transmisión de energía sobre y a través del dique son condicionantes fundamentales del diseño.

Cuando la altura de la coronación es suficiente como para evitar el rebase, se definirá el dique como no rebasable. Cuando el rebase condiciona la agitación interior o el uso de la coronación, el dique será rebasable. Si la coronación queda en algún momento bajo el nivel del mar, el dique se denomina sumergido.

Los diques rompeolas se suelen diseñar con diferentes capas, con piezas de tamaño decreciente desde el manto exterior, o manto principal, hasta el núcleo. Los mantos secundarios, con piezas de tamaño decreciente hacia el interior, deben cumplir la misión de apoyo y filtro con las piezas de los mantos adyacentes. Estos diques se denominarán multicapa. En algunos casos, bien debido al pequeño volumen del dique, a la disponibilidad de material, o a la escasa importancia de la transmisión a través del dique u otros factores, es económico construir diques de una sola capa, esto es, monocapa.

Debido a la carencia de escolleras adecuadas en las canteras o al costo del hormigón para las piezas artificiales del manto se estudia la posibilidad de introducir material granular procedente de RCDs como sustitución al árido natural para la fabricación de bloques cúbicos en masa.

Para los bloques cúbicos se utiliza un cemento tipo CEM III/B resistente al agua del mar (SR, MR), óptimo desde el aspecto de durabilidad y con una resistencia de 32,5 MPa o 42,5 MPa que nos exige el Pliego de Prescripciones Técnicas. Se dosificará por su peso y no por su volumen.

Las proporciones de árido fino y árido grueso se obtendrán por dosificación de áridos de los tamaños especificados a la vista de los resultados de los ensayos efectuados. Únicamente puede ser modificada la cantidad de agua en función de la humedad de los áridos.

CAPITULO 3: FASE EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se ha descrito detalladamente el procedimiento seguido para la fabricación de los diferentes tipos de hormigones reciclados. El estudio se ha iniciado con la caracterización de los materiales utilizados en la fabricación de los diferentes hormigones. Seguidamente, se han calculado las diferentes dosificaciones variando el porcentaje de sustitución del árido grueso natural por el árido reciclado.

En el proceso de caracterización se han determinado los parámetros necesarios para la posterior dosificación de las tres fracciones del árido natural, arena, gravilla y grava, así como el árido reciclado mixto y la cantidad de cemento a utilizar.

Para la realización del estudio se ha trabajado con dos tipologías de cemento diferentes. En una primera serie se ha utilizado un cemento tipo CEMI 42.5 SR y, en una segunda, un tipo de cemento CEMIII/A 42.5 N/SR, con resistencia al agua de mar.

En ambas tipologías se ha estudiado el efecto de los diferentes porcentajes de sustitución del árido reciclado y la utilización de la diferente clase de agua (agua convencional y agua de mar) y se han realizado los mismos ensayos para estimar las propiedades físicas, las propiedades mecánicas, el tiempo de fraguado y las retracciones.

Una vez obtenidos todos los resultados, se ha realizado una comparación entre todos ellos, observando cual es la combinación más favorable entre todos los tipos de hormigones fabricados. Se han comparado los resultados según el tipo de agua utilizada y según el porcentaje del árido reciclado utilizado.

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

El primer paso, antes de empezar con la fabricación de hormigones, ha sido el de determinar todas las características del material con el que se ha trabajado. A partir de estas propiedades de los materiales, se ha podido realizar el cálculo de las dosificaciones. Seguidamente se muestran dichas propiedades de cada uno de los materiales utilizados.

3.2.1 CEMENTO

Cómo ya se ha comentado en la introducción del capítulo, para la investigación de este proyecto se ha trabajado con dos tipologías de cemento, con el fin de ver cómo se comportan cada uno de ellos ante la sustitución de áridos reciclados y la utilización de agua marina. Hay que destacar que ambos cementos son cementos Portland con resistencia específica de 42.5 MPa.

En la siguiente tabla se muestra la composición química de cada uno de los cementos:

Tabla 3.1. Composición química de los cementos utilizados.

Material	CEMI 42.5 SR	CEM III/A 42.5 N/SR
Fe₂O₃	4,58	1,56
MnO	0,02	0,25
TiO₂	0,20	0,72
CaO	63,88	49,76
K₂O	0,78	0,88
P₂O₅	0,10	0,09
SiO₂	20,71	28,42
Al₂O₃	4,22	8,07
MgO	1,68	6,02
Na₂O	0,17	0,69

En esta tabla se presentan las características de estos dos tipos de cemento:

Tabla 3.2. Características de los cementos utilizados.

Cemento	% Clinker	Coefficiente de Blaine (cm ² /g)
CEM I 42,5 SR	95	3000
CEM III/A 42,5 N/SR	60	4500

El Clinker es el componente del cemento que otorga la resistencia característica de los cementos; El coeficiente de Blaine mide la finura del grano del cemento. Por lo tanto a más fino, más superficie específica tendrá este.

3.2.2 ÁRIDOS

Una de las partes más importantes de la fase experimental es la caracterización de los áridos utilizados. Es fundamental conocer todas sus propiedades. Éstas se han obtenido mediante diferentes ensayos, siguiendo las especificaciones de las normas UNE, mostradas en los subapartados siguientes.

3.2.2.1 COMPOSICIÓN

Para la determinación de la composición del árido grueso reciclado se ha seguido la Normativa Europea UNE EN 933-11, la cual especifica un método de inspección visual con el fin de identificar y cuantificar los materiales que lo componen.

Para la realización de este ensayo se han utilizado tres submuestras de aproximadamente 0,5 kg de peso cada una y se han separado, manualmente, sus componentes de manera visual.



Figura 3.1. Ensayo de composición de los áridos reciclados

3.2.2.2 GRANULOMETRIA

Para clasificar el árido según su granulometría ha sido necesario, antes que nada, cuartear previamente toda la muestra, con objeto de fraccionarla repetidas veces y obtener tres submuestras representativas. Seguidamente se ha introducido, según las especificaciones de la UNE-103100 (UNE-95B), en los tamices correspondientes y se ha extraído la clasificación granulométrica del árido.



Figura 3.2. cuarteador utilizado para la obtención de muestras representativas

En la norma UNE EN 933-1:1998 se especifica la medida nominal y la forma de las oberturas de los tamices, utilizados para determinar la granulometría de los áridos ensayados. En consideración, se han utilizado los siguientes tamices:

25 - 16 - 8 - 4 - 2 - 1 - 0,5 - 0,25 - 0,125 - 0,063 mm



Figures 3.3 i 3.4. Ensayo de granulometría de los áridos reciclados

3.2.2.3 DENSIDAD Y ABSORCIÓN

La densidad y la absorción del árido con el que se ha trabajado se han determinado de acuerdo con la normativa UNE-EN 1097-6:2000.

Para determinarlas se han tenido que obtener tres densidades diferentes, la densidad de partículas aparente, la densidad después de secado en estufa y la densidad de partículas saturadas con superficie seca. La absorción, por su parte, se define como la relación entre el aumento de la masa de la muestra de áridos debida a una imbibición parcial de agua y la masa seca de la misma muestra.



Figures 3.5. Secado de los áridos reciclados para la determinación de la densidad después del secado

3.2.2.4 ÁRIDOS RECLICLADOS MIXTOS

El tipo de áridos reciclados que se ha utilizado en la sustitución del árido natural en todas las fases de fabricación, ha sido un árido reciclado mixto procedente de la planta de reciclaje del Puerto de Barcelona, la cual pertenece a la empresa GESTIÓN DE TIERRAS Y ESCOMBROS, S.A. No obstante, se han utilizado dos fracciones de árido diferentes, debido al gran volumen requerido para realizar todo el conjunto de ensayos. Una fracción de áridos ha sido utilizada

por los primeros ensayos de propiedades físicas y propiedades mecánicas y, cuando éstos se agotaron, se pidió otra fracción de áridos, utilizada para analizar las retracciones en los hormigones.

Para la realización del estudio de propiedades del árido reciclado se han seguido los mismos ensayos descritos en el apartado anterior, empezando con el cuarteado de los áridos para obtener muestras representativas. En consideración, se han realizado dos series de estudios de propiedades de los áridos, una para cada fracción.

A continuación, se muestra la composición detallada de los elementos que conforman el árido reciclado utilizado en la fabricación de los hormigones.

Tabla 3.3. Composición de los áridos reciclados de las dos fracciones recibidas

Material	Árido reciclado (%)	Árido reciclado (%)
Rocas	41,12	52,89
Cerámicas	14,40	7,70
Hormigón	32,97	21,65
Asfalto	9,02	16,20
Yeso	1,74	1,16
Vidrio	0,46	0,30
Otros	0,28	0,10

Observando los valores de ambas fracciones se pueden extraer algunos datos interesantes. En primer lugar, es importante saber que el porcentaje de impurezas contenido en el árido es bajo, llegando apenas al 0,5 % del total. También se observa una gran cantidad de material reciclado procedente de materiales como el hormigón o el cerámico, hecho que, como ya se verá, afectará directamente a las propiedades de la densidad y la absorción.

Seguidamente se expone la tabla con las diferentes propiedades físicas de los áridos reciclados objeto del estudio

Tabla 3.4. Propiedades físicas de los áridos reciclados de la primera y segunda fracción

Propiedad física	Árido reciclado (%)	Árido reciclado (%)
Densidad después del secado (g/cm^3)	2,17	2,21
Densidad saturada (g/cm^3)	2,35	2,37
Absorción (%)	8,23	7,41

Se puede observar como las densidades de ambas fracciones de áridos son muy similares. No obstante, la segunda fracción de áridos, utilizada en el estudio relativo a las retracciones, muestra una absorción más elevada que la primera, hecho que se tendrá que tener en cuenta a la hora de hacer la dosificación para la realización del hormigón.

Por otro lado, se confirma lo expuesto en el apartado anterior, una cantidad de cerámicas importante en los áridos reciclados puede provocar un índice de absorción elevado.

Este último dato es realmente importante y se tiene que tener en cuenta en el momento de fabricar el hormigón, puesto que se puede perder la trabajabilidad del mismo en el momento de la fabricación por la absorción tan rápida del agua por parte del árido reciclado.

Para finalizar la caracterización del árido reciclado, se muestra la distribución granulométrica del mismo. Según las especificaciones de la norma ASTM C33-07, un árido será adecuado para la fabricación de hormigón, si su distribución granulométrica cumple con todos los límites exigidos.

Tabla 3.5. Distribución granulométrica de los áridos reciclados

Tamiz (mm)	Primera fracción	Segunda fracción
20	100	100
16	97,4	95,4
8	42	32,4
4	9,5	0
2	8,7	0
1	7,8	0
0,5	6,5	0
0,25	4,6	0
0,125	2,6	0
0,063	0,9	0

3.2.2.5 ÁRIDOS NATURALES

En este apartado se analizan las propiedades de los áridos naturales. Hay que destacar, primeramente, que la principal característica del árido convencional utilizado es su origen, éste se trata de un origen calcáreo.

Al igual que con el árido reciclado, en el caso del estudio del árido natural también se siguen las normativas UNE 83-133-90 y UNE 83-134-90, con las cuales se ha determinado la densidad y la absorción de los áridos.

Tabla 3.6. Densidad y absorción de los áridos naturales

Propiedad física	Grava	Gravilla	Arena
Densidad seca (g/cm³)	2,65	2,635	2,585
Absorción (%)	0,67	0,865	2,345

De la misma forma que para el árido reciclado, en la siguiente tabla se pueden observar las distribuciones granulométricas de las tres fracciones de áridos naturales, grava, gravilla y arena. En este caso, las distribuciones granulométricas de los tres elementos también cumplen con los límites exigidos por la UNE para que el material sea adecuado para la fabricación de hormigones.

Tabla 3.7. Distribución granulométrica del árido natural

Tamiz (mm)	% que pasa		
	Grava	Gravilla	Arena
16	46,68	100,00	100,00
8	24,66	56,15	100,00
4	13,26	0,62	99,37
2	0,67	0,25	64,86
1	0,00	0,18	32,96
0,5	0,00	0,16	16,47
0,25	0,00	0,14	7,44
0,125	0,00	0,08	2,78
0,063	0,00	0,03	0,69

3.2.3 ADITIVO

El aditivo es un ingrediente fundamental en la fabricación del hormigón. Para este proyecto en concreto, se ha utilizado un solo tipo de aditivo, un superplastificante, con el fin de hacer más manejable la pasta de hormigón fresco. El aditivo que se ha utilizado a lo largo de todas las fabricaciones ha sido el siguiente:

Sika viscocrete 20 he: este aditivo está formado por policarboxilatos modificados en base acuosa, concebido especialmente por aplicaciones en hormigones, preparado básicamente para mejorar la trabajabilidad, la bombabilidad y dar una textura más fluida al hormigón. Resulta un aditivo que puede dar resultados óptimos incluso para aquellos hormigones con bajos contenidos en cemento y capacidades de absorción altas. El elevado poder reductor de agua permite con facilidad la fabricación de todo tipo de hormigones, desde convencionales hasta autocompactantes, recomendando que la dosificación no exceda del 1,0 o el 1,5% de la cantidad de cemento.

3.3 FABRICACIÓN DE LOS HORMIGONES

La fabricación del hormigón se ha dividido en tres fases, donde se ha optado por diferentes dosificaciones según las necesidades de volumen que requería el llenado de probetas y por distintos tipos de hormigones. En todas las fases todos los hormigones se han realizado cuatro veces; el primero con agua de mar y el segundo con agua dulce convencional y además se ha variado el cemento utilizado, CEM I 42.5 SR y CEM III/A 42.5 N/SR. Estas tres fases de fabricación se han dividido según la finalidad de cada una de ellas, la primera ha servido para estudiar del tiempo de fraguado, la segunda ha abarcado el estudio de propiedades físicas y mecánicas y, por último, la tercera para el control de las retracciones.

En la primera fase se realizaron ocho amasadas, cuatro con agua de mar y cuatro con agua dulce, y en cada una de ellas se ha fabricado un hormigón convencional y otro con sustitución del 100% del árido grueso por áridos reciclados, siempre variando el cemento utilizado para cada hormigón. Esta primera fase sirvió para analizar el fraguado de los hormigones.

En la segunda fase se realizaron dieciséis amasadas, las ocho primeras con las mismas características que en la primera fase y las restantes, con sustitución del 50% y del 20% del árido grueso por árido reciclado e igual que en la primera fase, variando el tipo de cemento, cuatro con agua de mar y cuatro con agua dulce. En esta fase se analizaron las propiedades físicas y mecánicas.

En la tercera y última fase, se han realizado los mismos hormigones que en la primera fase pero en dos subfases, es decir, se han hecho dieciséis amasadas puesto que se ha realizado el mismo hormigón dos veces. En esta fase se han analizado los tres tipos de retracciones: de secado, autógena y plástica además de probetas de control para las propiedades mecánicas analizadas en la fase dos.

3.3.1 NOMENCLATURA DE LAS PROBETAS

Para poder mantener un orden y control de los cientos de probetas que se han realizado cada probeta se marcaba con un código donde se indicaba el tipo de hormigón y la fecha de fabricación.

La siguiente tabla refleja los tipos de hormigón y su nomenclatura:

Tabla 3.8. Nomenclatura de los diferentes hormigones

	HORMIGÓN			NOMENCLATURA
FASE 1	CEM I	Agua Dulce	Convencional	HC-D CEM I
			100% sustitución árido reciclado	HR100-D CEM I
		Agua de Mar	Convencional	HC-M CEM I
			100% sustitución árido reciclado	HR100-M CEM I
	CEM III	Agua Dulce	Convencional	HC-D CEM III
			100% sustitución árido reciclado	HR100-D CEM III
		Agua de Mar	Convencional	HC-M CEM III
			100% sustitución árido reciclado	HR100-M CEM III
FASE 2	CEM I	Agua Dulce	Convencional	HC-D CEM I
			100% sustitución árido reciclado	HR100-D CEM I
			50% sustitución árido reciclado	HR50-D CEM I
			20% sustitución árido reciclado	HR20-D CEM I
		Agua de Mar	Convencional	HC-M CEM I
			100% sustitución árido reciclado	HR100-M CEM I
			50% sustitución árido reciclado	HR50-M CEM I
			20% sustitución árido reciclado	HR20-M CEM I
	CEM III	Agua Dulce	Convencional	HC-D CEM III
			100% sustitución árido reciclado	HR100-D CEM III
			50% sustitución árido reciclado	HR50-D CEM III
			20% sustitución árido reciclado	HR20-D CEM III
		Agua de Mar	Convencional	HC-M CEM III
			100% sustitución árido reciclado	HR100-M CEM III
			50% sustitución árido reciclado	HR50-M CEM III
			20% sustitución árido reciclado	HR20-M CEM I
FASE 3	CEM I	Agua Dulce	Convencional	HC-D CEM I
			100% sustitución árido reciclado	HR100-D CEM I
		Agua de Mar	Convencional	HC-M CEM I
			100% sustitución árido reciclado	HR100-M CEM I
	CEM III	Agua Dulce	Convencional	HC-D CEM III
			100% sustitución árido reciclado	HR100-D CEM III
		Agua de Mar	Convencional	HC-M CEM III
			100% sustitución árido reciclado	HR100-M CEM III

3.3.2 DOSIFICACIÓN

Todos los hormigones convencionales se han fabricado utilizando arena, gravilla y grava caliza. En varios de ellos se ha sustituido el árido natural por el árido reciclado.

Cabe resaltar que la utilización de áridos reciclados para la fabricación de hormigones requiere una mayor cantidad de agua debido a su capacidad de absorción. Sería conveniente utilizar

estos áridos en estado de saturación o con una alta cantidad de humedad, sin embargo saturar los áridos antes de fabricar el hormigón es difícil en algunas ocasiones y en ese caso es necesario añadir agua suficiente (aproximadamente el 80% de su capacidad de absorción) para que no se reduzca demasiado la trabajabilidad del hormigón fresco. Antes de empezar cada fabricación se humedeció el árido reciclado hasta alcanzar una humedad próxima al 7% para unos mejores resultados y se determinó su humedad para una dosificación adecuada. Para la mejora de la trabajabilidad, en todas las fabricaciones se ha utilizado una cantidad de aditivo súper plastificante.

La relación agua/cemento total del HC es de 0.50 y se estima que la relación agua/cemento efectiva es de 0.445 de acuerdo a la capacidad de absorción que tienen los áridos en los primeros 30 minutos, siendo éstas de aproximadamente del 80% en la arena, y 20 % en los áridos gruesos. Todos los hormigones con áridos reciclados se diseñan con la relación agua/cemento de 0.445, siendo el total mayor al hormigón convencional debido a la alta capacidad de absorción de agua que presentan estos áridos.

En las siguientes tablas vienen resumidas las cantidades de material utilizadas para cada hormigón, debido a la cantidad de dosificaciones realizadas se ha hecho un resumen donde se observa que a igualdad relación agua/cemento la cantidad de agua total en cada hormigón varía.

Tabla 3.9. Dosificaciones empleadas en la fabricación con la primera remesa de áridos reciclados

NOMENCLATURA	CEMENTO	ARENA	GRAVILLA	GRAVA	ÁRIDO REICLADO	AGUA	a/c TOTAL	% ADITIVO
HC-D CEM I	300	976	210	765	0	150	0,45	0,40-0,60
HR100-D CEM I	300	976	0	0	815,00	210,00	0,45	1,0-1,3
HR50-D CEM I	300	976	105	382,0	407,00	179,00	0,45	0,55-0,60
HR20-D CEM I	300	976	168	612	163,00	162,00	0,45	0,50-0,75

Tabla 3.10. Dosificaciones empleadas en la fabricación con la segunda remesa de áridos reciclados

NOMENCLATURA	CEMENTO	ARENA	GRAVILLA	GRAVA	ÁRIDO REICLADO	AGUA	a/c TOTAL	% ADITIVO
HC-D CEM I	300	976	210	765	0	150	0,45	0,5-0,6
HR100-D CEM I	300	976	0	0	801,00	216,00	0,45	0,5-0,6

Se han diferenciado dos tablas a causa, como ya se ha explicado anteriormente, de las dos remesas de áridos recibidos.

3.3.3 FABRICACIÓN

La fabricación de todos los hormigones se ha realizado en el laboratorio de Materiales de Construcción del departamento de Ingeniería de la Construcción de la UPC. Para la fabricación de probetas se utiliza una mezcladora de eje vertical.

Para fabricar las diferentes amasadas hemos seguido el mismo orden, procedimientos y las mismas pautas para todos y cada uno de los hormigones. El primer paso que debemos hacer después de haber calculado la dosificación del hormigón a fabricar, es el de pesar todos los materiales. Es decir, el peso de la arena, de la gravilla, de la grava, del cemento, del agua y del aditivo. En el caso de utilizar áridos reciclados, previo a este paso hay que calcular la humedad del árido puesto que esto nos hará variar las cantidades de todos los materiales menos del cemento.

En segundo paso se introducen en la mezcladora las dos fracciones de árido más grandes (grava, gravilla y/o árido reciclado según los porcentajes) y a continuación se vierte la fracción más fina realizando un primer ciclo de mezclado. Una vez realizada esta mezcla de áridos se vierte el cemento y seguidamente se realiza el último ciclo intentando añadir el agua en el menor tiempo posible desde la puesta en marcha de la mezcladora. El aditivo superplastificante se añade en última instancia para mejorar la trabajabilidad del hormigón dada la baja relación a/c.



Figura 3.6. Mezcladora de eje vertical empleada en la fabricación de los hormigones



Figura 3.7. Materiales utilizados para la fabricación del hormigón convencional

Tras dos minutos de amasado constante se verifica, mediante una inspección visual, que el hormigón sea una mezcla homogénea sin segregación de los materiales. En el caso de este estudio, no se ha realizado el cono de Abrams en ninguna fabricación para medir la consistencia del hormigón, se ha trabajado con una consistencia blanda para todos los hormigones.

3.3.4 LLENADO DE PROBETAS, COMPACTACIÓN Y CONSERVACIÓN

Para llevar a cabo esta parte de la fase experimental, se ha tomado como referencia la norma UNE-EN 12390-2:2001 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.

Después de haber realizado la amasada y dar por buena la consistencia obtenida, se debe introducir el hormigón fresco en el interior de los moldes para que se conserven durante las primeras 24 horas, es decir, hasta que fragüe cada pieza por completo. Antes de verter el contenido de hormigón en el interior de los moldes debemos verificar que éstos están impregnados con una capa de aceite que tras el fraguado nos permitirá desmoldar los moldes de manera más fácil.

Este paso de colocar el hormigón en el interior de los moldes consiste en la introducción de la pasta en los moldes en tres capas, cada una de las cuales deberá ser compactada con 25 golpes. Además de eso, se debe golpear los moldes por su parte exterior con una maza para poder de expulsar el aire ocluido en el hormigón. También se ha utilizado la compactación por vibración; el procedimiento es parecido, se divide en la introducción de la pasta en tres tongadas con una vibración de 15 segundos en la mesa vibrante entre llenado y llenado. Después de haber vertido el hormigón en el interior del molde, habiendo compactado cada una de las tres capas y habiendo expulsado el aire de su interior mediante el golpeo con la maza lo cual no se realiza en la compactación por vibración, se procede al enrase de las probetas. Lo único de lo que se trata, es de conseguir que la parte superior quede lo más lisa posible para evitar problemas a la hora de ensayar las probetas.

Los moldes utilizados para cada fase experimental y por cada hormigón han sido los siguientes:

- Fase 1



Figura 3.8. Moldes utilizados en la primera fase

2 moldes prismáticos de 10 x 10 x 40 cm: Utilizados para llenarlos de mortero y calcular el tiempo de fraguado

- Fase 2



Figura 3.9. Moldes utilizados en la segunda fase

3 moldes cilíndricos 10 x 20 cm: Utilizados para ensayos tales como la resistencia a compresión, a tracción, módulo elástico y penetración de cloruro.

6 moldes cúbicos con capacidad para 2 probetas de 10 x 10 x 10 cm: Utilizados para ensayos de resistencia a compresión y ensayos de densidad y absorción.

2 moldes prismáticos de 10 x 10 x 40 cm: Utilizados para ensayos de flexión.

- Fase 3



Figura 3.10. Moldes utilizados en la tercera fase



Figura 3.11. Moldes utilizados en la tercera fase

2 moldes cilíndricos de 300 x 150 cm: Utilizados para ensayos de retracción autógena

2 moldes prismáticos de 7,5 x 7,5 x 25,5 cm: Utilizados para retracción por secado

2 moldes prismáticos de 600 x 150 x 150 cm: Utilizados para ensayos de retracción plástica

3 moldes cilíndricos de 10 x 20 cm: Utilizados para ensayos de resistencia a compresión y tracción indirecta

La conservación y desmolde de probetas es muy diferenciado según la fase de fabricación:

Fase 1: En esta primera fase donde se estudia el hormigón fresco y por tanto una vez ha fraguado, unas 5 horas después de la fabricación del hormigón, las probetas se vacían de hormigón y se limpian.

Fase 2: Las probetas se conservan durante aproximadamente un día en los moldes cubiertas por una arpillera húmeda, de forma que la temperatura esté comprendida entre 16°C y 27°C. Además se añade un plástico por encima para que se conserve la humedad

Transcurridas 24 horas se extraen de los moldes las probetas y se marcan de forma que no se alteren las superficies que han de estar en contacto con los platos de la prensa de ensayo.

Posteriormente las probetas se transportan a la cámara húmeda, donde se almacenan hasta la realización de los ensayos. La cámara húmeda, ilustrada en la figura 16, se mantiene en condiciones estacionarias de 21°C y casi el 95% de humedad. Dentro de la cámara húmeda las probetas seguirán un ciclo específico, solo ser desencofradas se sumergirán en agua dulce o agua de mar según se hayan fabricado con una o con otra (en el caso de ser sumergidas en agua de mar, éstas también serán tapadas para que el agua de la cámara húmeda no se mezcle con el agua salada) y una semana después se dejarán en la cámara húmeda, y así consecutivamente.



Figura 3.12. Cámara húmeda

Fase 3: En el caso de las probetas para ensayos de retracción autógena en lugar de ser tapadas con arpillera y plástico, éstas son precintadas con cinta metálica para evitar la evaporación de agua, se introducen en la cámara seca y se conectan las galgas previamente introducidas y sujetas en el molde al ordenador. Transcurridas las primeras 24 h se desconectan para desencofrar, se forra toda la probeta de cinta metálica y se vuelven a dejar conectadas al ordenador en la cámara seca. Las probetas para los ensayos de retracción plástica se introducen en la cámara seca igual pero sin ningún recubrimiento, solo se introduce un lector LVdt en un extremo para leer la variación que experimenta la probeta a causa de la retracción. Por último las probetas para retracción de secado y las de control de propiedades mecánicas si son tapadas como en la fase 2 aunque las de retracción de secado irán a la cámara seca y las otras seguirán el mismo ciclo que las de la segunda fase.



Figura 3.13. Cámara seca. Probetas retracción plástica, autógenas y de secado

3.4. ENSAYOS REALIZADOS

En los próximos apartados se explicarán cuáles son todos los ensayos a los cuales han sido sometidos todos los hormigones, y se detallará qué datos se obtienen con cada uno de ellos.

Destacar que este apartado de ensayos es uno de los más importantes del trabajo de investigación realizado, puesto que es donde se verán reflejados todos los resultados esperados.

Primeramente, se detallan los ensayos de propiedades físicas, la densidad, la absorción y el volumen de poros, seguido de los ensayos de propiedades mecánicas, resistencia a compresión, flexo-tracción y módulo elástico, y finalmente tiempo de fraguado y retracciones.

3.4.1 ENSAYOS DE PROPIEDADES FÍSICAS

3.4.1.1 ENSAYOS DE DENSIDAD, ABSORCIÓN Y VOLUMEN DE POROS ACCESIBLES

Los primeros ensayos que se presentan en este apartado son aquellos que permiten determinar las propiedades físicas de los hormigones. En consideración, se ha de determinar la densidad, la absorción y el volumen de poro.

Para la realización de este ensayo se han seguido las especificaciones según las normas UNE 83-312-90 y ASTM C642-97. Las probetas utilizadas para llevarlo a cabo han sido unas probetas cúbicas de 10x10x10 cm y, con objeto de obtener unos resultados representativos, se ha realizado el ensayo con tres probetas cúbicas para cada tipo de hormigón.

A continuación se muestran las fórmulas marcadas por la normativa en el cálculo de todos los parámetros que permiten obtener los tipos de densidades y de absorción.

$$\text{Absorción después de inmersión (\%)}: [(B-A)/A] \cdot 100$$

$$\text{Absorción después de ebullición (\%)}: [(C-A)/A] \cdot 100$$

$$\text{Densidad seca: } [A/(C-D)] \cdot \rho = g_1$$

$$\text{Densidad después de inmersión: } [B/(C-D)] \cdot \rho$$

$$\text{Densidad después de ebullición: } [C/(C-D)] \cdot \rho$$

$$\text{Densidad aparente: } [A/(A-D)] \cdot \rho = g_2$$

$$\text{Volumen de poros (\%)}: (g_2 - g_1)/g_2 \cdot 100 \text{ ó } (C-A)/(C-D) \cdot 100$$

Como se puede observar, en cada fórmula aparecen los parámetros A, B, C y D. Todos ellos pertenecen a los pesos de las probetas obtenidos en diferentes estados.

Respecto al primer caso, el peso A, se corresponde con el peso seco de la probeta, determinado después de 24 horas en estufa a unos 100°C y perdiendo así, toda el agua que pueda tener en su interior.

Para determinar el peso B, primero se han tenido que sumergir durante 72 horas las probetas recién sacadas de la estufa, para conseguir saturar la muestra completamente de agua. Una vez pasadas las 72 horas, se ha secado toda el agua superficial de las probetas y se han pesado, obteniendo así el segundo peso.

Para obtener el peso C se han hervido durante 5 horas las probetas previamente sumergidas en agua durante 72 horas. Este procedimiento se ha realizado con el fin de saturar definitivamente la muestra y conseguir el tercer peso necesario para determinar las propiedades físicas de los hormigones.

Finalmente, el último peso necesario para completar el ensayo es el peso D. Para su obtención, se ha calculado el peso hidrostático de las probetas previamente hervidas durante 5 horas.

3.4.2 ENSAYOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS

Este ensayo resulta crucial para la caracterización de los hormigones con los que se ha trabajado. Es de gran importancia, sobre todo en el mundo de la construcción, saber cómo se comportará el material en situaciones de esfuerzo y tensión para conocer, de este modo, si su uso será el adecuado. Por eso es necesario someter las probetas a ensayos destructivos.

En este apartado, por lo tanto, se describirán todos los ensayos realizados para determinar las propiedades mecánicas del hormigón, tales como la resistencia a compresión, a flexo-tracción y el módulo de elasticidad.

3.4.2.1 ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Para los ensayos correspondientes a la obtención de la resistencia a compresión, las probetas utilizadas han sido probetas cilíndricas de dimensiones 10x20 cm. Para determinar la resistencia de cada hormigón se han ensayado tres probetas, con objeto de obtener un resultado representativo, y se han seguido las especificaciones marcadas a la norma UNE 83-304-84 para su ejecución. Los ensayos se han realizado a 7 y 28 días, tres probetas para cada edad del hormigón, 2 probetas cúbicas y una cilíndrica.

Las probetas cilíndricas han de ser pulidas previamente al ensayo de compresión a causa de tener solo dos caras planas una de las cuales queda en la superficie a la hora de encofrar por lo que la sección no es lisa. El pulido de las probetas sirve para alisar la cara superior que quedará en contacto con la prensa, ya que de no ser así la superficie de contacto entre la probeta i la prensa no sería la total de la probeta y los resultados obtenidos no serian los correctos. El ensayo de compresión aplica una fuerza, sobre una superficie determinada; si la superficie de contacto no es la correcta los resultados serán erróneos.

A continuación se muestra la maquina utilizada en el pulido de probetas:



3.14. Pulidora de probetas cilíndricas

La maquinaria utilizada en este ensayo ha cumplido con los requisitos correspondientes exigidos por la normativa. Se trata de una prensa hidráulica prevista de un sistema de regulación de cargas, de forma que éstas se puedan aumentar de forma continua. Los dos platos de acero que conforman la prensa deben de ser lo suficientemente espesos como para evitar cualquier tipo de deformación durante el ensayo.

El procedimiento seguido durante el ensayo ha sido relativamente sencillo, puesto que únicamente ha tratado de aplicar la carga sobre la probeta de forma continua a una velocidad de unos 0,5 MPa/s. Se ha tomado la carga de rotura máxima como la carga medida en el momento en el que la probeta se ha deformado de manera muy rápida, apenas antes de romper.



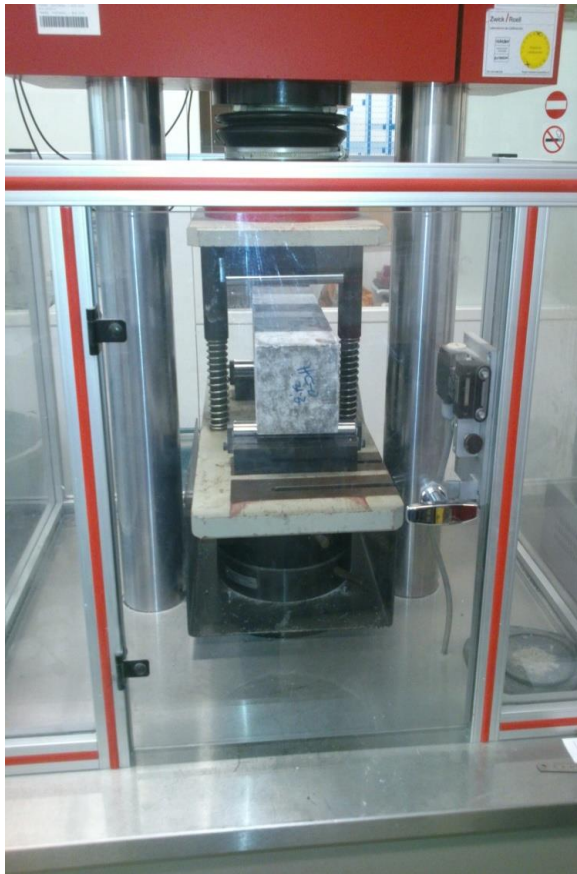
Figuras 3.15. Prensa utilizada en el ensayo de resistencia a compresión

3.4.2.2 ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXO-TRACCIÓN

Se ha evaluado también la resistencia a flexo-tracción de los hormigones a la edad de 28 días. Para cada tipo de hormigón, se han ensayado dos probetas prismáticas de dimensiones 10x10x40 cm de acuerdo con lo marcado en la norma UNE 83305.

El ensayo ha consistido en aplicar una carga de flexión a las probetas hasta ruptura, utilizando la misma maquinaria que en el ensayo de compresión simple. Este golpe el mecanismo de transmisión de las cargas, ha consistido en dos rodillos para el apoyo de la probeta y dos más para la aplicación de la carga. Estos rodillos tienen una sección circular con un diámetro de 20,0 mm y una longitud superior a 10,0 mm a la dimensión menor de la probeta a ensayar. La distancia entre ellos ha sido tres veces la dimensión menor de la probeta.

Para la ejecución del ensayo, no ha sido necesario el pulido de las probetas, puesto que el contacto de la prensa con la misma se ha realizado eligiendo dos caras opuestas perfectamente planas, quedando la única cara rugosa en uno de los laterales, tal y cómo se muestra en la siguiente figura.



Figuras 3.16. Disposición de la probeta prismática en el ensayo de flexo-tracción



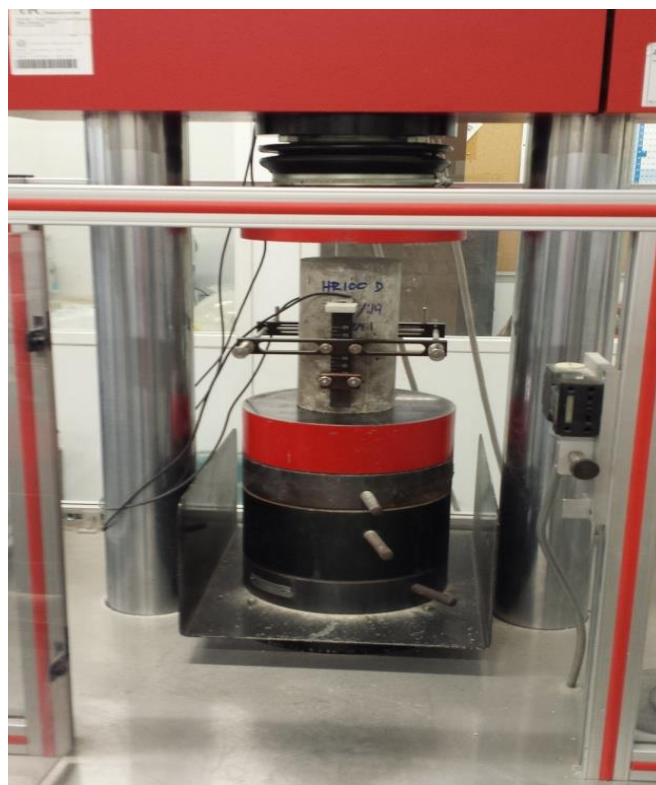
Figuras 3.17. Colocación de los rodillos para la correcta transmisión de las cargas a las probetas

3.4.2.3 MÓDULO DE ELASTICIDAD

Para la evaluación del módulo de elasticidad se han fabricado dos probetas cilíndricas de 10x20 cm para cada tipo de hormigón, realizando este ensayo a los 28 días de edad. Para su determinación se ha seguido lo estipulado en la normativa UNE 83-316-96.

Previamente a este ensayo, se ha obtenido el valor de la resistencia a ruptura por compresión del mismo tipo de probetas cilíndricas, puesto que se aplican tres ciclos de carga hasta un tercio del valor de la tensión de ruptura por compresión obtenida.

Por su parte, la tensión se ha incrementado uniformemente a una velocidad de 0,5 N/mm/s hasta este valor, en el que se ha mantenido durante 60 segundos y se ha registrado la deformación medida, tomando lecturas de cada línea de medida con intervalos de 30 segundos.



Figuras 3.18. Ensayo de módulo elástico en ejecución

3.4.3 TIEMPO DE FRAGUADO

Para el estudio del tiempo de endurecimiento del hormigón objeto de estudio se han seguido las exigencias correspondientes a la normativa ASTM C 403, la cual determina esta variable mediante la medida de la resistencia a la penetración. Este método ha permitido determinar los efectos sobre el tiempo de fraguado y sobre las características de este proceso en variables tales como el porcentaje de áridos reciclados utilizados o el tipo de agua en la mezcla.

Esta norma adopta como definición de tiempo inicial y final del tiempo de fraguado:

- Tiempo inicial de fraguado: tiempo transcurrido a partir del contacto inicial entre cemento y agua de mezcla, hasta lograr una resistencia a la penetración de 3,5 Mpa.
- Tiempo final de fraguado: tiempo transcurrido a partir del contacto inicial entre el cemento y el agua de mezcla, hasta lograr una resistencia de 27,6 Mpa

Para la realización del estudio de fraguado se han utilizado probetas prismáticas de dimensiones 10x10x40 y un penetrómetro, aparato utilizado para la aplicación de la carga, constituido por un dispositivo de reacción que permite la aplicación de una fuerza hasta 500N. Este aparato está previsto de un sistema de acoplamiento de agujas, las cuales disponen de un corte indicando la penetración correspondiente a 25,0 mm. Las agujas utilizadas en este ensayo han estado de secciones circulares y áreas de 645, 484, 323, 215, 161, 129, 65, 21 y 16. La longitud de las agujas es tal que se evita el pandeo.

El procedimiento seguido ha empezado con la fabricación de la muestra y el tamizado de la misma, seguido de la colocación del hormigón en el molde. La muestra se ha mantenido a una temperatura constante de ensayo correspondiente y se ha procedido a insertar la aguja con el área adecuada, según el endurecimiento de la muestra. Se ha aplicado una fuerza vertical de arriba abajo gradual y uniforme, hasta que la aguja ha penetrado el hormigón 25 mm en la superficie. El tiempo necesario para la penetración de la aguja es aproximadamente de 10 segundos. Seguidamente, se registra la fuerza necesaria y el tiempo transcurrido desde el inicio de la fabricación.

La distancia entre las aplicaciones de la aguja ha sido igual o superior a dos diámetros de la aguja utilizada, no teniendo que ser menor en ningún momento a 15,0 mm. Aun así, la distancia entre cualquier aplicación de la aguja y los lados del molde tienen que ser igual o superior a los 25,0 mm.



Figuras 3.19. Ensayo tiempo de fraguado.

3.4.4 RETRACCIONES

Se ha determinado la retracción autógena y la retracción por secado en los hormigones convencionales y en los hormigones con un 100,0% de áridos reciclados, ambas tipologías diferenciando los hormigones con agua natural y agua de mar. Con los hormigones ensayados a retracción de secado también se ha determinado la pérdida de peso.

Los ensayos de retracción autógena y retracción de secado se han llevado a cabo bajo las mismas condiciones de conservación de las probetas. En una cámara climática con unas condiciones de temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y unas condiciones de humedad del $50\% \pm 5\%$.

Previo a la realización del ensayo se ha requerido la preparación de los moldes con el material necesario para que el mismo se realice con éxito.



Figuras 3.20. Control de humedad y temperatura en la habitación climática

3.4.4.1 RETRACCIÓN PLÁSTICA

Este ensayo se ha realizado con el hormigón fresco, con el cual se han ido almacenando datos ininterrumpidamente durante las primeras 24 horas desde el inicio de fabricación del hormigón.

Para su determinación, primeramente se ha tenido que fabricar el hormigón a evaluar y se han llenado dos moldes de dimensiones 60x15x15 cm. Estos moldes han consistido en tres piezas metálicas forradas con una capa de teflón, ayudando a que no existiera ningún tipo de adherencia con el molde y permitir, de este modo, los pequeños movimientos del hormigón sin ningún tipo de impedimento. Estas tres piezas han ido enganchadas mediante un conjunto de roscas. También se ha dispuesto una pieza de silicona al final del molde sin ir sujeta a

ninguno otro elemento del mismo, con objeto de permitir el libre movimiento del hormigón. En los laterales se han puesto placas metálicas, una de ellas con cuatro tornillos, donde ha quedado empotrado el hormigón, y el otro con un agujero, por donde se pasaba el LVDT (elemento para la toma de la medida). Entre la pieza de silicona y el molde, se han instalado unos tacos de madera para que cuando se introduzca el hormigón en el molde, éste esté bien colocado.

Aun así, el hormigonado se ha efectuado en una mesa vibratoria, con el fin de asegurar una mezcla homogénea de las probetas.

Después del hormigonado y amoldado se han colocado dentro de la cámara climática, donde se ha procedido a situar los LVDT. Estos han sido conectados a un sistema de adquisición de datos y a una fuente de alimentación. Los datos procesados por este sistema se han enviado a un ordenador, el cual extraía la información de las retracciones en hojas excel.

Se ha estimado, aproximadamente, que el tiempo entre el inicio de fabricación del hormigón y la colocación de los LVDT ha sido de unos 20 minutos. Tiempo que se ha considerado necesario por todo el proceso de amoldado, compactación y colocación hasta la primera toma de datos.

3.4.4.2 RETRACCIÓN AUTÓGENA

En el caso de la retracción autógena, se han fabricado probetas cilíndricas de 30x15 cm. En cada una de estas probetas se ha colocado una galga extensiométrica embebida con hilo de nilón resistente dentro del molde. Este procedimiento ha sido de gran importancia y gran esfuerzo, siendo necesaria una gran precisión y cuidado en la instalación, debido a que la galga es delicada y no puede recibir golpes ni movimientos bruscos, puesto que desvirtuaría los resultados.

En cada hormigonada, se han llenado las dos probetas cilíndricas cubriendo su parte superior con una capa de cinta de aluminio, para evitar el contacto con el exterior y consecuentemente la pérdida de agua. Una vez cubiertas, se han traído a la cámara climática y se han conectado al sistema de adquisición de datos durante 24 horas.

Al día siguiente de la fabricación, se han vaciado las probetas y se han sellado completamente con cinta de aluminio, conectando otra vez las probetas al sistema de adquisición de datos 27 días más. Finalmente, este sistema ha ido tomando datos cada minuto durante un total de 28 días



Figuras 3.21. Probeta de retracción autógena cubierta con cinta de aluminioy conectada a la base de datos

3.4.4.3 RETRACCIÓN DE SECADO

En este caso, las condiciones de conservación de las probetas han sido muy similares a los otros dos casos, aún así, el procedimiento llevado a cabo ha sido diferente. Para este ensayo, se han fabricado dos probetas prismáticas de dimensiones 255x75x75 cm para cada tipo de hormigón y se han ensayado en consideración a la normativa ASTM C596. Aun así, se han instalado unos pivots en los extremos de las probetas para la posterior medición de la retracción.

Apenas después de su fabricación, colocación en los moldes y endurecimiento (24h), se han sumergido en agua durante 48 horas, tal como especifica la norma. Pasadas estas 48 horas, se han dejado en la cámara climática con unas condiciones de 20°C de temperatura y 50% de humedad.

La medición de la retracción de secado se ha efectuado de forma manual, con un medidor de longitud sujetando las probetas por los pivots de los extremos. También se ha determinado el peso de las probetas desde el inicio hasta los 28 días de edad, tomando medidas a los 3, 7, 14 y 28 días de edad, tal y como marca la normativa correspondiente.



Figuras 3.22. Medición de la retracción de secado con las probetas prismáticas

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

Después de haber finalizado todo el proceso de fase experimental, es decir, una vez acabadas las fabricaciones de cada tipo de hormigón y sus correspondientes ensayos, se dedica un capítulo entero a recapitular toda la información obtenida, plasmar todos los resultados de la investigación, compararlos entre ellos y discutirlos en cada caso. Estos datos obtenidos se han presentado en tablas y gráficos, con el fin de facilitar al lector el análisis de los resultados.

En resumen, el procedimiento de análisis seguido ha sido lo siguiente:

1. Propiedades físicas
2. Propiedades mecánicas
3. Tiempo de fraguado
4. Retracciones

El procedimiento que se ha seguido para analizar los datos ha sido un proceso ordenado. Diferenciado en dos procesos de análisis según el ensayo de estudio.

En un primer lugar, para los apartados de propiedades físicas y propiedades mecánicas, se ha realizado un análisis de los resultados organizando la explicación en tres subapartados. El primero de estos tres subapartados ha sido destinado al análisis del comportamiento del hormigón convencional, diferenciando el hormigón fabricado con agua natural y agua de mar. Seguidamente, se ha procedido a analizar las propiedades adquiridas por los hormigones ejecutados con diferente porcentaje de áridos reciclados. Finalmente, se ha elaborado una comparativa de resultados entre el hormigón convencional y el reciclado. Todo este procedimiento se ha realizado independientemente con las dos tipologías de cemento, CEMI 42,5 SR y CEMIII/A 42,5 N/SR.

En un segundo tipo de análisis, se han explicado los resultados de los ensayos del tiempo de fraguado del hormigón y las retracciones del mismo. En este procedimiento de análisis, las explicaciones se han estructurado independientemente en dos bloques, un bloque en lo referente al hormigón fabricado con cemento CEMI y el otro en lo referente a los hormigones elaborados con cemento CEMIII. En cada uno de estos bloques se ha analizado la variación de la propiedad estudiada en función de las dos variables de estudio, el agua de mar y los áridos reciclados.

4.2. PROPIEDADES FÍSICAS

En primer lugar, se han analizado las propiedades físicas de los diferentes hormigones fabricados. Como se ha comentado en el respectivo capítulo de Fase experimental, este ensayo ha sido regulado por la norma ASTM C 642-97.

En cada propiedad física se han detallado los resultados de cada hormigón, separando la fabricación con cemento tipo CEMI y cemento tipo CEMIII, en tablas, de forma que se pueda tener una idea rápida y visual de la influencia de cada tipo de hormigón en las propiedades. Aun así, se ha considerado la realización de un análisis gráfico de todos los resultados para poder compararlos entre ellos.

4.2.1 DENSIDAD SECA

En la siguiente tabla se muestran todos los valores de las densidades secas extraídas del ensayo de propiedades físicas para cada hormigón:

Tabla 4.1. Resultados de la densidad seca obtenidos en el ensayo de propiedades físicas

		Densidad seca (g/cm ³)
CEMI	HC-D	2,38
	HC-M	2,37
	HR100-D	2,11
	HR100-M	2,18
	HR50-D	2,23
	HR50-M	2,28
	HR20-D	2,32
	HR20-M	2,35
CEMIII	HC-D	2,37
	HC-M	2,38
	HR100-D	2,14
	HR100-M	2,18
	HR50-D	2,27
	HR50-M	2,28
	HR20-D	2,32
	HR20-M	2,34

4.2.1.1 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL

En el siguiente gráfico se muestra una comparativa de las diferentes densidades secas de cada uno de los hormigones convencionales, es decir, los fabricados con diferente tipo de cemento (CEMI y CEMIII) y agua (dulce y de mar), pero con áridos naturales.

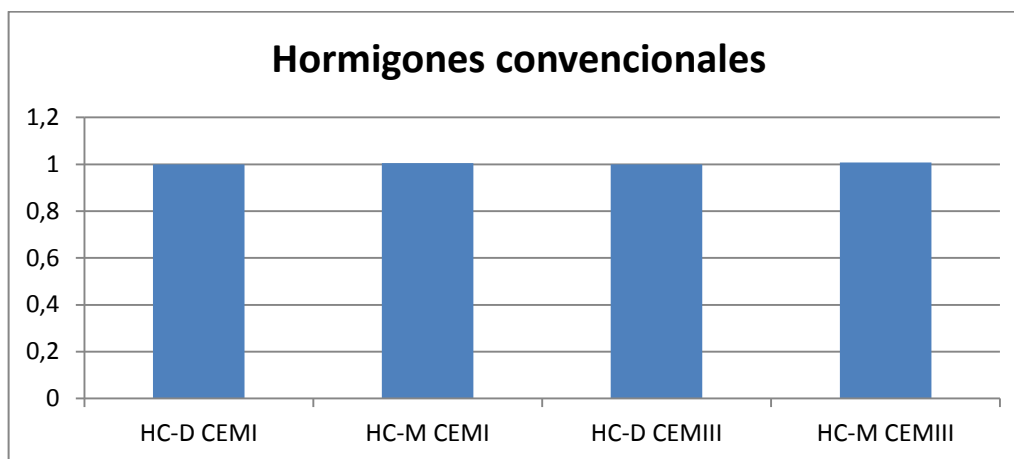


Gráfico 4.1. Comparativa de la densidad seca en los diferentes tipos de hormigones convencionales

Con los valores anteriores presentados se puede observar como en todos los hormigones convencionales se cumple con el valor mínimo exigido por el Pliego de Prescripciones Técnicas del Puerto de Barcelona (2,3 g/cm³), por lo tanto, se puede considerar que cualquiera de ellos es apto para ser utilizado.

El gráfico 4.1 muestra la densidad seca de todos los hormigones convencionales en función de un hormigón patrón u hormigón de control. Este hormigón patrón se ha considerado que sea fabricado con cemento tipo CEMI y agua dulce. Una de las primeras conclusiones que se puede extraer del gráfico anterior, es la gran similitud que hay en la densidad seca entre los diferentes tipos de hormigones convencionales.

4.2.1.2 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CON ÁRIDOS RECICLADOS

En este apartado se ha analizado la misma propiedad pero, en este caso, con hormigones reciclados. A continuación, se presenta un gráfico donde se plasman los resultados de las densidades secas de los hormigones fabricados con diferentes porcentajes de sustitución de áridos reciclados.

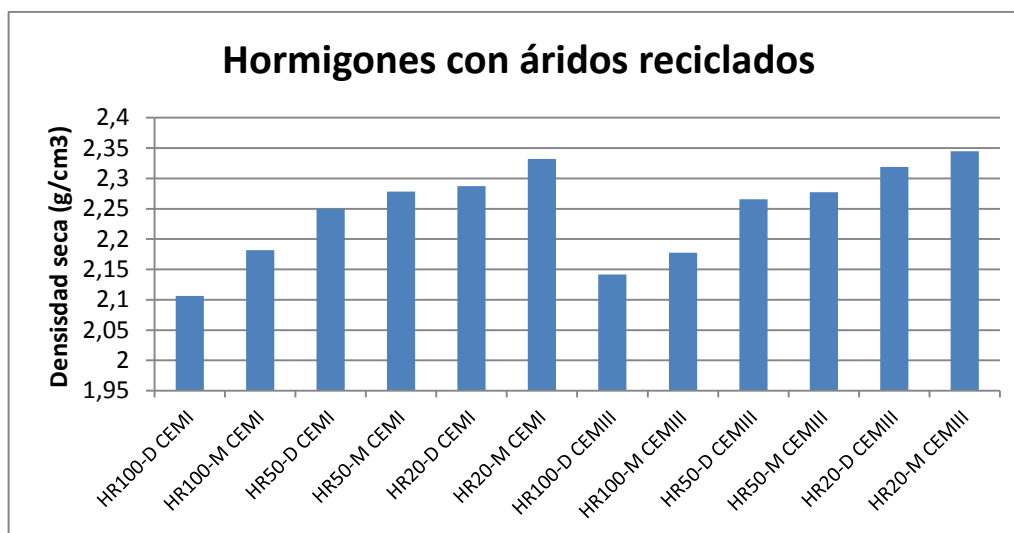


Gráfico 4.2. Comparativa de la densidad seca en los diferentes tipos de hormigones reciclados

La primera conclusión extraída del gráfico anterior es que, a diferencia de los hormigones convencionales, algunos hormigones fabricados con áridos reciclados no cumplen con la densidad mínima exigida por el Pliego de Prescripciones Técnicas del Puerto de Barcelona (2,3 kg/dm³). Concretamente, a excepción de los hormigones con un 20% de áridos reciclados, todos los otros no cumplen con la especificación de los 2,3 kg/dm³ mínimo exigido.

Como segunda conclusión, se puede observar que aquellos hormigones con mayor porcentaje de áridos reciclados sustituidos, dan valores inferiores de densidad. Este hecho queda expresado de forma muy clara si se lee el gráfico anterior de izquierda a derecha, a medida que disminuimos la cantidad de árido reciclado en el hormigón la barra del histograma va aumentando, es decir, los hormigones van incrementando su densidad seca.

Este resultado también era de esperar, puesto que el árido reciclado tiene una densidad inferior a la del árido convencional. Consecuentemente, a mayor cantidad de sustitución de árido reciclado, menor densidad del hormigón.

Por otro lado, se demuestra el mismo que, con el comportamiento de los hormigones convencionales, la densidad del hormigón aumenta al utilizar agua marina en su fabricación.

4.2.1.3 COMPARATIVA ENTRE HORMIGÓN CONVENCIONAL Y HORMIGÓN RECICLADO

En este apartado se procede a hacer un análisis comparativo entre las densidades de los hormigones convencionales y los hormigones reciclados. Con esta comparativa se ha pretendido encontrar como varía la densidad entre los diferentes tipos de hormigones.

Se han estudiado las densidades de los hormigones en cuatro bloques según el tipo de cemento utilizado, CEMI y CEMIII, y el tipo de agua de la mezcla, agua natural y agua marina.

Para realizar esta comparativa se ha considerado fijar siempre con valor unitario la densidad seca del hormigón convencional, y expresar las restantes densidades secas en función de este hormigón de control.

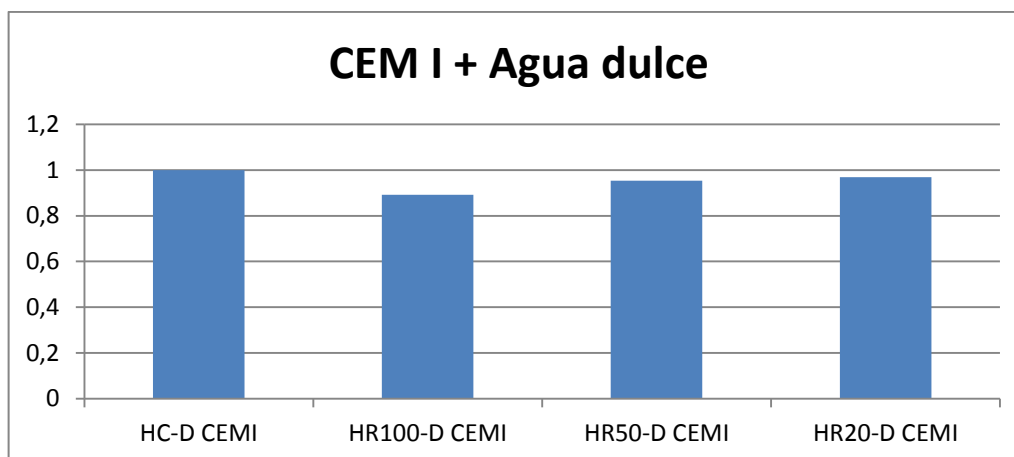


Gráfico 4.3. Comparativa de la densidad seca entre el hormigón convencional y el reciclado con CEMI y agua dulce

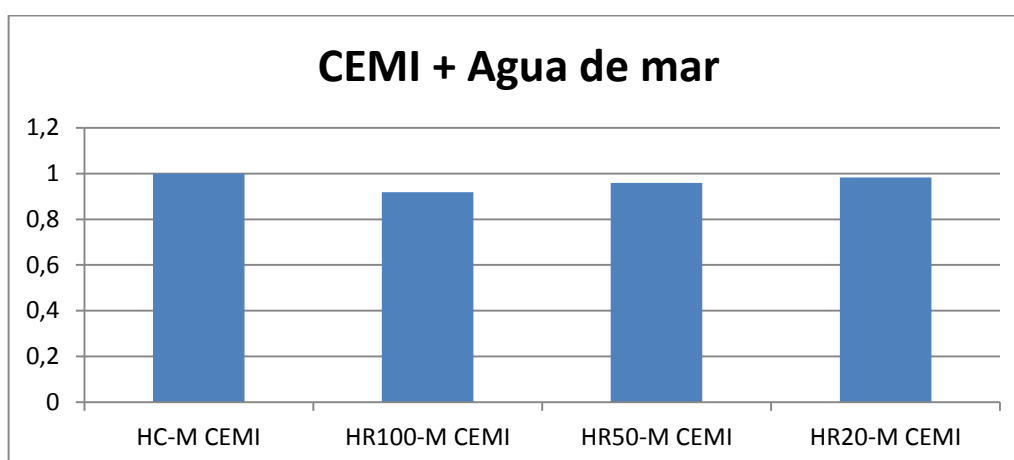


Gráfico 4.4. Comparativa de la densidad seca entre el hormigón convencional y el reciclado con CEMI y agua de mar

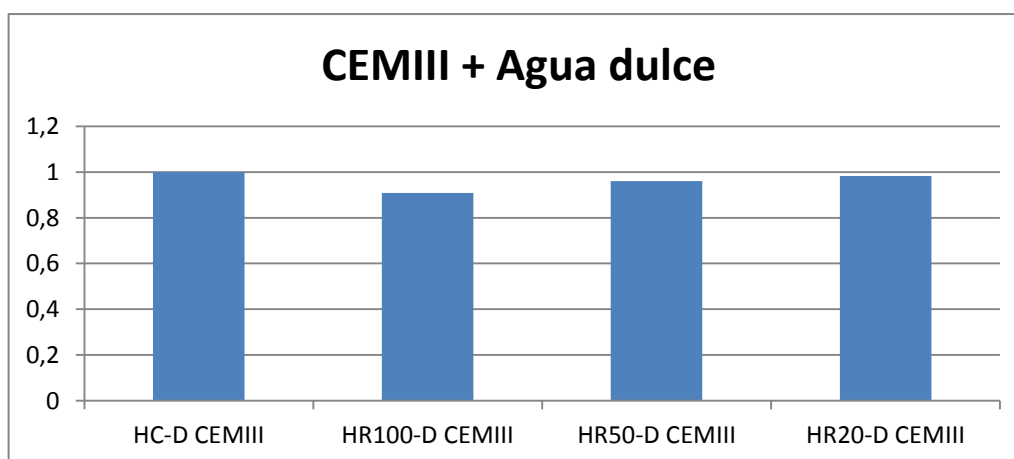


Gráfico 4.5. Comparativa de la densidad seca entre el hormigón convencional i el reciclado con CEMIII y agua dulce

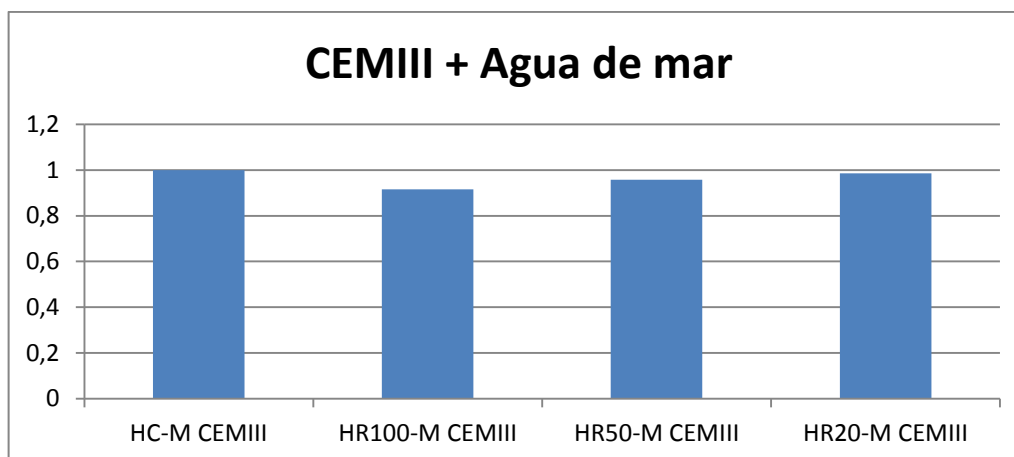


Gráfico 4.6. Comparativa de la densidad seca entre el hormigón convencional i el reciclado con CEMIII y agua de mar

En todos los casos expuestos, independientemente del tipo de cemento utilizado y el tipo de agua de la mezcla, se puede observar como existe un descenso en la densidad de los hormigones con árido reciclado respecto a los convencionales. En ningún caso se logra la densidad seca del hormigón convencional (hormigón patrón). En consideración, se extrae la misma conclusión que en el apartado correspondiente al comportamiento del hormigón con áridos reciclados, a mayor porcentaje de sustitución de áridos reciclados menos densidad seca.

4.2.2 VOLUMEN DE POROS ACCESIBLES

En la siguiente tabla se muestran todos los valores obtenidos para el volumen de poros accesibles de cada uno de los hormigones una vez finalizado el ensayo de propiedades físicas.

Tabla 4.2. Resultados del volumen de poros accesibles obtenidos en el ensayo de propiedades físicas

		Volumen de poros accesibles (%)
CEMI	HC-D	7,12
	HC-M	6,47
	HR100-D	12,6
	HR100-M	10,75
	HR50-D	9,49
	HR50-M	7,74
	HR20-D	7,46
	HR20-M	7,52
CEMIII	HC-D	6,05
	HC-M	5,34
	HR100-D	8,67
	HR100-M	8,52
	HR50-D	7,21
	HR50-M	7,04
	HR20-D	7,03
	HR20-M	6,39

4.2.2.1 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL

Para el estudio de la variación del volumen de poro y el comportamiento del hormigón convencional en relación a esta característica, se empieza exponiendo un gráfico en el que se puede observar de forma comparativa los diferentes valores del volumen de poro para cada uno de los hormigones convencionales fabricados.

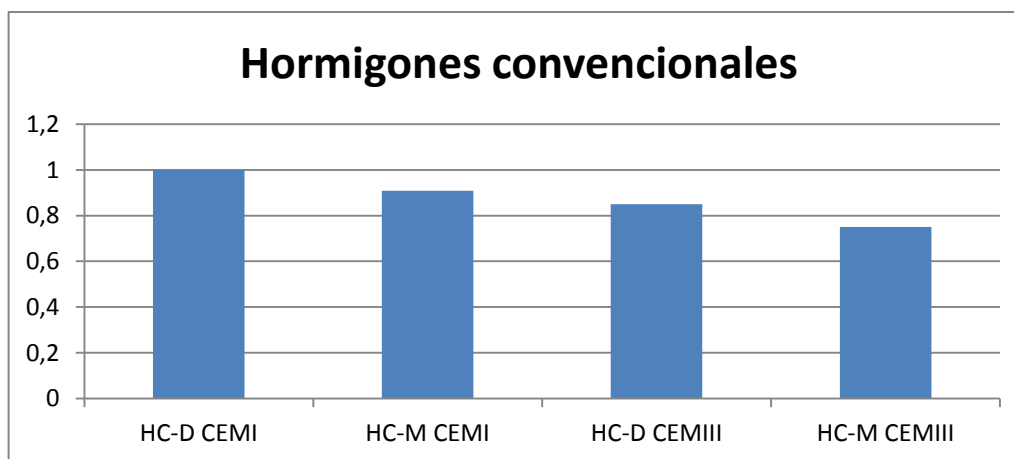


Gráfico 4.7. Comparativa del volumen de poros accesibles entre los diferentes tipos de hormigones convencionales

Como se puede observar en el gráfico anterior, los hormigones convencionales fabricados con agua natural han obtenido un mayor volumen de poros accesibles respecto a los fabricados con agua marina. Esta característica sucede tanto en los hormigones con cemento CEMI como los hormigones con cemento CEMIII. Este hecho era de esperar, puesto que el agua de mar es más densa que el agua natural a causa de las sales disueltas que contiene y se capaz de llenar mejor todos los poros que puedan crear durante el fraguado del hormigón.

Más en detalle, si se fija esta diferencia del volumen de poros accesibles entre la fabricación con agua natural y agua marina, se tiene que para el hormigón con CEMI existe un incremento del 10,05% en volumen de poros accesibles en la fabricación con agua natural respecto a la del agua de mar. Con CEMIII este incremento supone un 13,3%.

Otra conclusión que se puede extraer, es la variación del volumen de poro accesibles que hay entre la fabricación con cemento tipo CEMI y tipo CEMIII. En el gráfico anterior se puede apreciar el aumento del volumen de poro en los hormigones fabricados con CEMI respecto a los hormigones con CEMIII. Numéricamente, esta diferencia se ha reflejado al comparar los hormigones convencionales con agua dulce, donde la diferencia del volumen de poros accesibles ha sido de un 17,69%, y con agua marina, donde ha sido de un 21,16%.

4.2.2.2 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CON ÁRIDOS RECICLADOS

En este apartado se ha estudiado el comportamiento del hormigón reciclado versus el volumen de poro. Seguidamente, se ha plasmado en un gráfico los datos obtenidos en el ensayo de propiedades físicas, con el objetivo de que el lector se pueda formar una visión general de la influencia del árido reciclado en el volumen de poro.

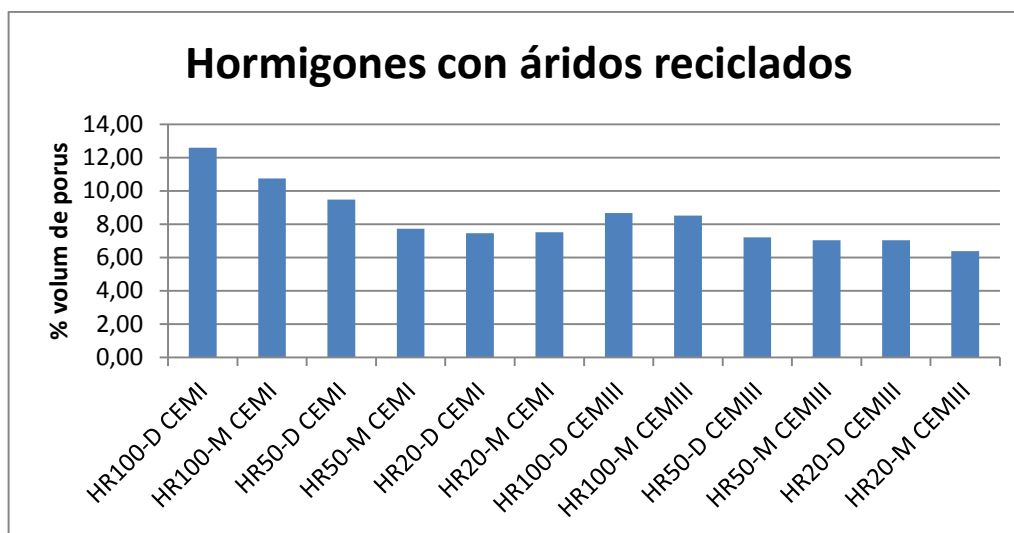


Gráfico 4.8. Comparativa del volumen de poros accesibles en los diferentes tipos de hormigones reciclados

Una de las conclusiones que se pueden extraer de este gráfico es que a medida que aumenta el porcentaje de árido reciclado en la fabricación de los hormigones, el volumen de poro también lo hace. Es decir, cuánto más áridos reciclados se utilicen en el hormigón, más poroso será éste. Esto es debido a la porosidad propia de los áridos reciclados, al estar compuesto de diferentes tipos de áridos, como los áridos reciclados procedentes del hormigón reciclado.

Por otro lado, se refuerza la conclusión de que el volumen de poro es más elevado en los hormigones fabricados con CEMI que con CEMIII, deducida en el apartado anterior. Este hecho es causado por la finura del cemento tipo III, al tener un Clinker más fino tiene más superficie de contacto con el agua lo que le otorga que sea más compacto y en consecuencia menos poroso.

También se refuerza la idea de que la fabricación con agua natural supone un mayor índice de volumen de poro que el obtenido en la fabricación con agua marina. En este caso la explicación es la misma que para la densidad seca, al ser más densa el agua de mar por las sales que tiene disueltas, éstas son capaces de llenar más poros, reduciendo así el volumen de poros accesibles.

De manera más puntual, fijando la comparativa sólo en el cemento tipo I, se puede observar qué el aumento del volumen de poros accesibles en la utilización del 100% de los áridos reciclados respecto a la utilización del 50%, supone un incremento del 32,77% en agua dulce, y un 38,89% en agua de mar. Mientras que en el cemento tipo III, esta diferencia entre el 100% de sustitución del árido reciclado y el 50% de utilización del mismo, no es tan notoria, representando solamente un 20,25% en agua dulce y un 21,02% en agua marina.

4.2.2.3 COMPARATIVA ENTRE HORMIGÓN CONVENCIONAL Y HORMIGÓN RECICLADO

Mediante los gráficos presentados a continuación se describe la comparación entre los valores del volumen de poro de los hormigones convencionales y los hormigones fabricados con árido reciclado. Se observa esta variación de la porosidad en cuatro bloques independientemente uno del otro. Estos cuatro bloques corresponden a los mismos en que se ha dividido la

comparativa de las otras propiedades físicas estudiadas hasta ahora, CEMI y agua natural, CEMII y agua marina, CEMIII y agua natural y CEMIII y agua de mar.

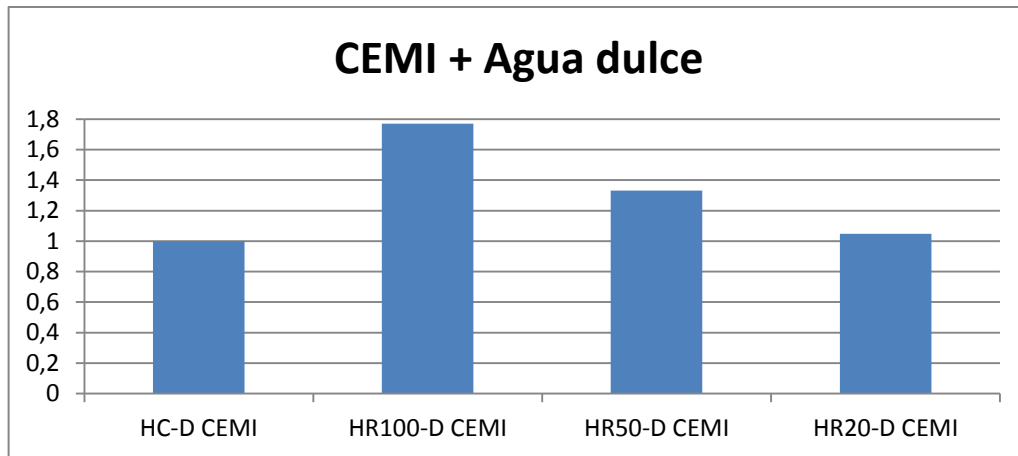


Gráfico 4.9. Comparativa del volum de poros accesibles entre el hormigón convencional i el hormigón reciclado con CEMI y agua dulce

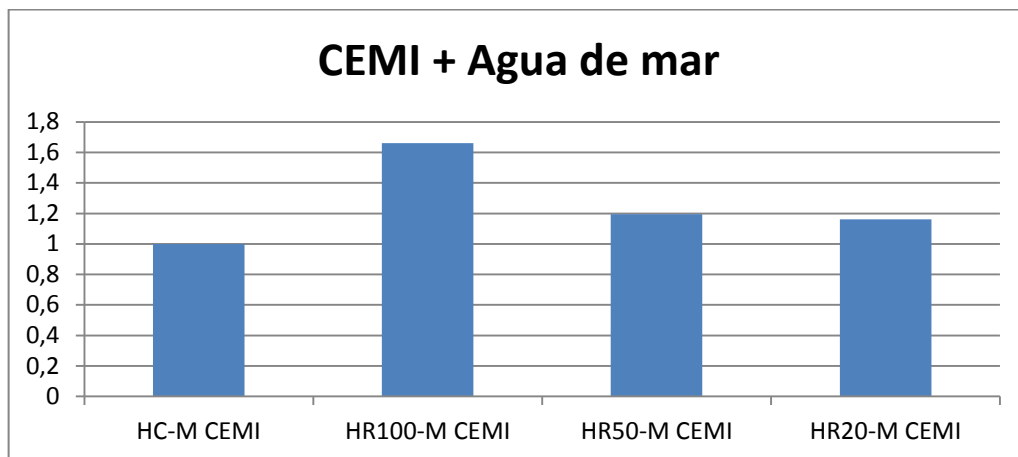


Gráfico 4.10. Comparativa del volum de poros accesibles entre el hormigón convencional i el hormigón reciclado con CEMI y agua de mar

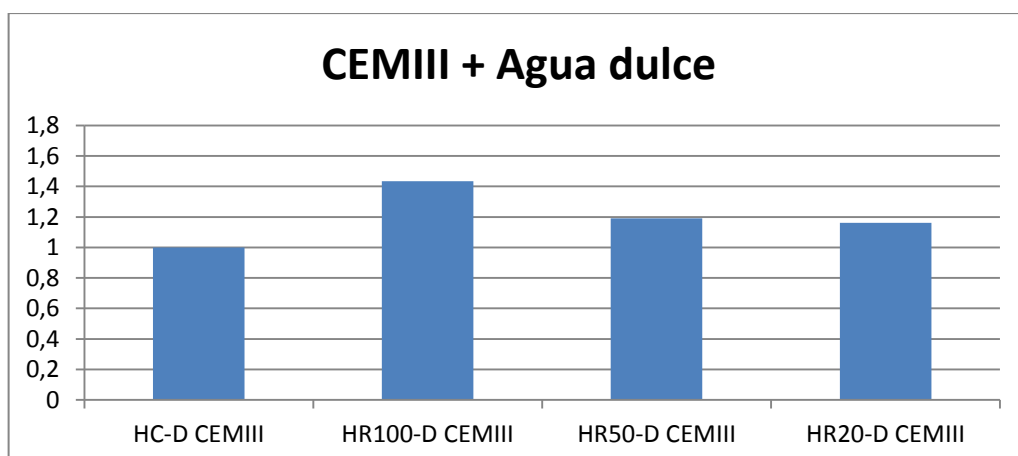


Gráfico 4.11. Comparativa del volum de poros accesibles entre el hormigón convencional i el hormigón reciclado con CEMIII y agua dulce

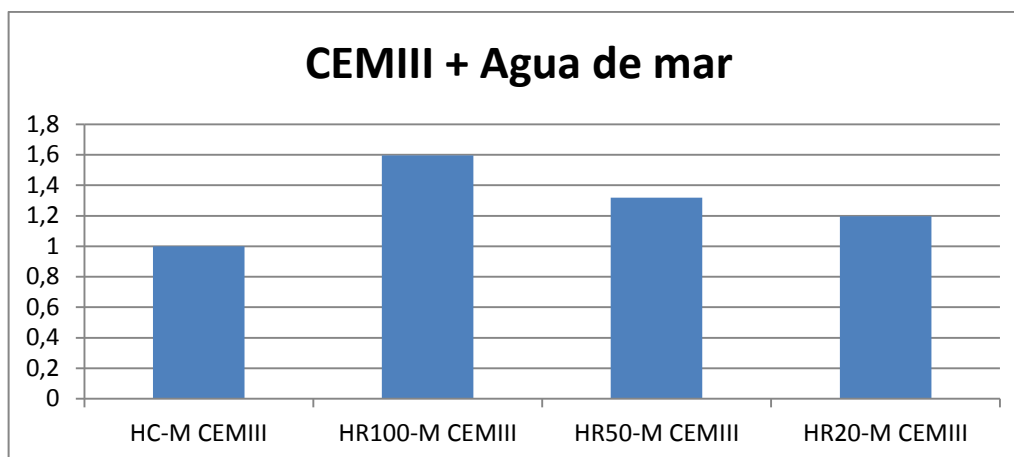


Gráfico 4.12. Comparativa del volumen de poros accesibles entre el hormigón convencional i el hormigón reciclado con CEMIII y agua de mar

Cómo se puede observar en los anteriores gráficos se sigue en todos ellos la misma tendencia, a más árido reciclado sustituido, más volumen de poro presenta el hormigón estudiado. Se puede ver como la barra del histograma más elevada corresponde a la máxima sustitución del árido reciclado y, a medida que se va yendo a la derecha, la barra del histograma se va reduciendo por el mismo motivo (menos sustitución del árido reciclado). Además, todas las barras correspondientes a los hormigones con áridos reciclados quedan por encima de la barra del hormigón de control, es decir, en cualquier hormigón con árido reciclado se tiene más volumen de poro que el hormigón convencional.

Fijando numéricamente esta tendencia, se observa cómo, en la fabricación con CEMI y agua natural, utilizando un 100% de los áridos reciclados en la fracción gruesa del hormigón se obtiene un 76,97% más de porosidad que el respectivo hormigón convencional patrón. En la fabricación con el mismo tipo de cemento pero agua de mar, sólo se obtiene un incremento del 25,68% en el volumen de poros accesibles, por el hecho de que las sales disueltas ocupan parte de los poros accesibles. Por otro lado, respecto a la fabricación de los hormigones con CEMIII, se obtiene un incremento del 23,69% en la utilización de agua natural y un 29,88% con agua marina, hecho que corrobora lo anteriormente visto, el cemento CEM III al ser más fino consigue tener menos volumen de poros accesibles.

4.2.3 ABSORCIÓN

En la siguiente tabla se resumen todos los valores de la absorción extraídos del ensayo de propiedades físicas para cada hormigón.

Tabla 4.3. Resultados de la absorción obtenidos en el ensayo de propiedades físicas

		Absorción (%)
CEMI	HC-D	2,98
	HC-M	2,69
	HR100-D	5,88
	HR100-M	4,78
	HR50-D	4,19
	HR50-M	3,32
	HR20-D	3,19
	HR20-M	3,13
CEMIII	HC-D	2,46
	HC-M	2,21
	HR100-D	3,98
	HR100-M	3,73
	HR50-D	3,09
	HR50-M	2,98
	HR20-D	3,00
	HR20-M	2,59

La absorción es consecuencia del volumen de poros accesibles, a más volumen de poros, mas absorción tendrán los hormigones. Si se observa la tabla 4.2 se puede ver la relación entre estas dos propiedades.

4.2.3.1 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL

En el siguiente gráfico se muestra una comparativa entre las diferentes absorciones de cada uno de los hormigones convencionales estudiados en esta tesina.

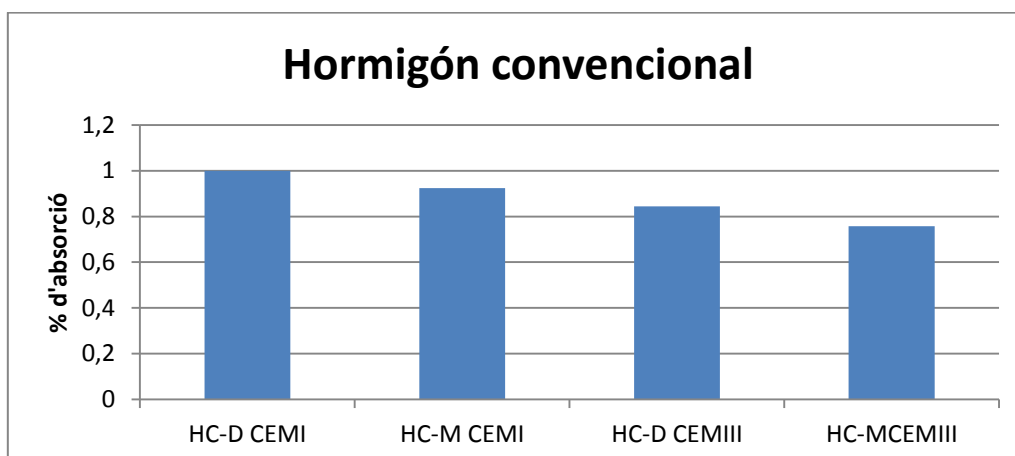


Gráfico 4.13. Comparativa de la absorción entre los diferentes tipos de hormigones convencionales

Lo primero que se observa en esta gráfica es la diferencia en el valor de la absorción de los hormigones fabricados con CEMI y los hormigones fabricados con CEMIII. Los primeros muestran un ligero incremento de absorción respecto a los hormigones fabricados con CEMIII. En el caso de utilización de agua dulce, los hormigones fabricados con cemento tipo CEMI tienen una absorción un 4,29% superior a los fabricados con CEMIII. Igualmente, fijando ahora el caso de utilización de agua de mar, los hormigones con CEMI tienen una absorción un 15,95% superior a los hormigones con CEMIII. Las razones de estas disminuciones de la absorción son claras, al ser más fino el CEM III y por tanto más compacto, se ha observado que el volumen de poros accesibles se reducía y, como se ha comentado al inicio de este punto, a menor volumen de poros, menor absorción.

Consecuentemente, se han extraído dos conclusiones, la primera es que el uso del cemento tipo CEMI SR produce que los hormigones tengan valores superiores en la propiedad física de la absorción. Y la segunda, que la tipología del agua utilizada también influye en la absorción de los hormigones. Los hormigones fabricados con agua de mar tienen menor absorción que los hormigones fabricados con agua dulce, ya que al ser más densa ocupa más poros accesibles y en consecuencia tiene menos absorción

4.2.3.2 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CON ÁRIDOS RECICLADOS

Una vez estudiado el comportamiento del hormigón convencional, se ha procedido a realizar el análisis del comportamiento de la absorción en los hormigones reciclados. En el próximo gráfico se han expuesto todos los resultados relativos en el ensayo físico para la obtención de la absorción para cada tipo de hormigón reciclado.

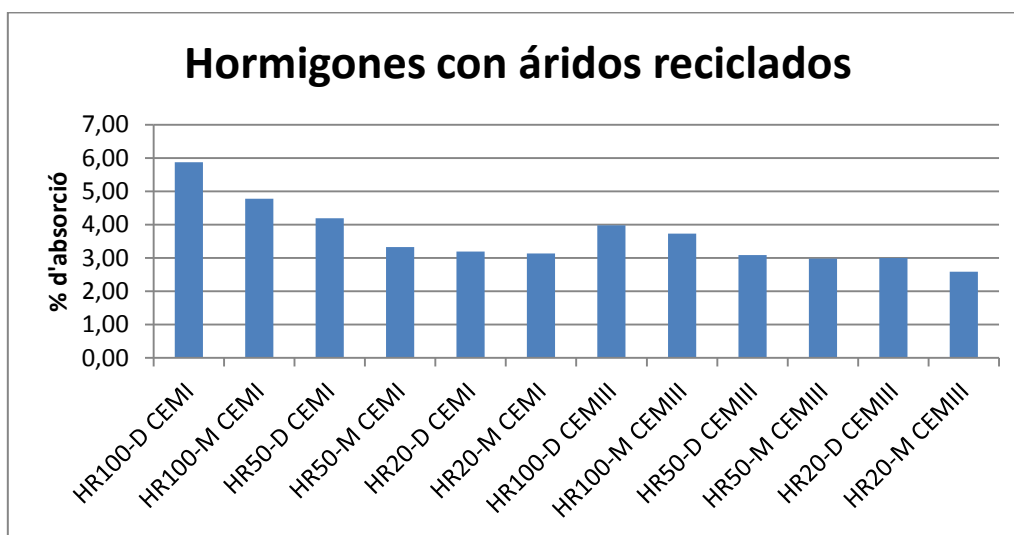


Gráfico 4.14. Comparativa de la absorción en los diferentes tipos de hormigones reciclados

En primer lugar, hay que destacar que de forma general la absorción crece a medida que aumenta el porcentaje del árido reciclado presente en el hormigón. Es decir, a mayor cantidad de árido reciclado sustituido en el hormigón, mayor es el grado de absorción de este hormigón. Este hecho se produce en consonancia con lo explicado ya en la fase experimental en relación a los áridos reciclados. En este capítulo ya se ha dado a conocer que el árido reciclado posee un mayor grado de capacidad de absorción que el árido natural. Por lo tanto,

esta mayor capacidad de absorción del árido reciclado frente el árido natural y la mayor porosidad de los áridos reciclados puede servir de explicación a este fenómeno de aumento de absorción en los hormigones fabricados con áridos reciclados.

Por otro lado, se vuelve a demostrar que los hormigones fabricados con un cemento tipo CEMI dan resultados de absorción mayores que los hormigones fabricados con CEMIII. La explicación a este hecho es la misma que la extraída en el apartado anterior, la fabricación de hormigones con CEMII producen menor volumen de poros y por tanto menor absorción.

Puntualizando uno por uno los gráficos de cada hormigón, se pueden corroborar las conclusiones extraídas en los párrafos anteriores. Si se consideran las tres características mencionadas anteriormente que provocan una menor absorción en un mismo hormigón, este sería el HR20-M CEMIII, puesto que tanto el agua de mar, el tipo de cemento CEMIII y la baja sustitución de árido reciclado producen una reducción de la absorción. Este hecho se corrobora con el gráfico 4.7, donde se puede observar claramente que la barra más baja del histograma, es decir con menos capacidad de absorción, corresponde con el hormigón HR20-M CEMIII. Pasa lo mismo fijando ahora las variables que producen una absorción máxima, en este caso se correspondería con el hormigón HR100-D CEMI. Observando el gráfico anterior se comprueba que, efectivamente, la barra más elevada (con más capacidad de absorción) es la que se corresponde con el hormigón HR100-D CEMI.

4.2.3.3 COMPARATIVA ENTRE HORMIGÓN CONVENCIONAL Y HORMIGÓN RECICLADO

En este apartado se ha procedido a efectuar el análisis comparativo entre las capacidades de absorción de los hormigones convencionales y los hormigones reciclados. Se pretende encontrar como varía la absorción entre los diferentes tipos de hormigones y en que porcentajes aumenta o disminuye según la cantidad de árido reciclado ha sido sustituido en el mismo.

Se ha estudiado la característica física de la absorción en cuatro bloques separadamente, según se han fabricado los hormigones con cemento tipo Y o III y se ha utilizado agua natural o agua de mar.

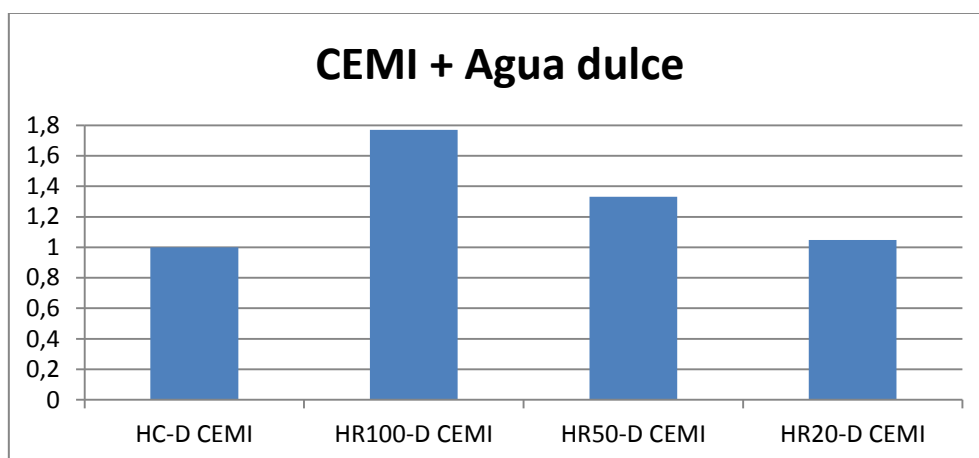


Gráfico 4.15. Comparativa de la absorción entre el hormigón convencional y el hormigón reciclado con CEMI y agua dulce

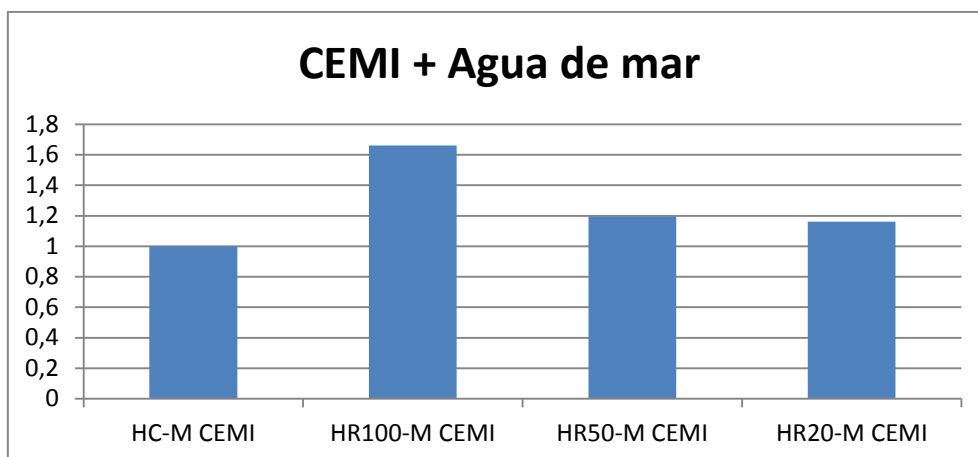


Gráfico 4.16. Comparativa de la absorción entre el hormigón convencional y el hormigón reciclado con CEMI y agua de mar

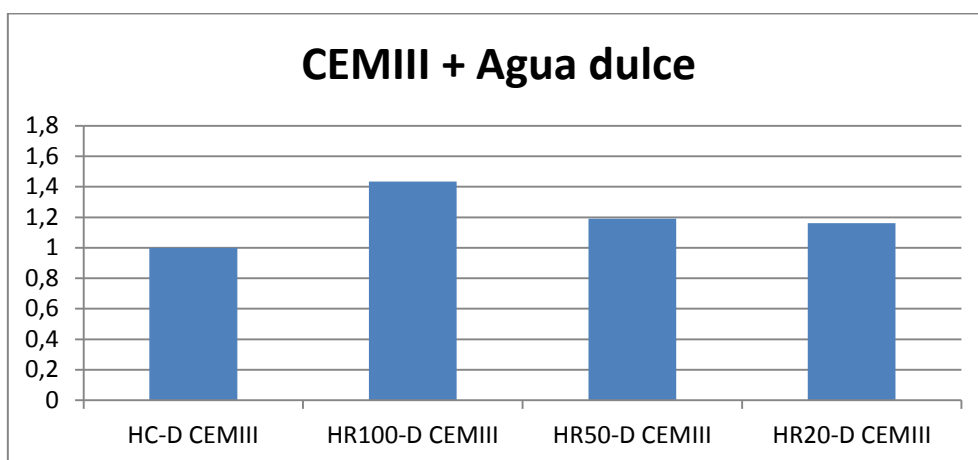


Gráfico 4.17. Comparativa de la absorción entre hormigón convencional y el hormigón reciclado con el CEMIII y agua dulce

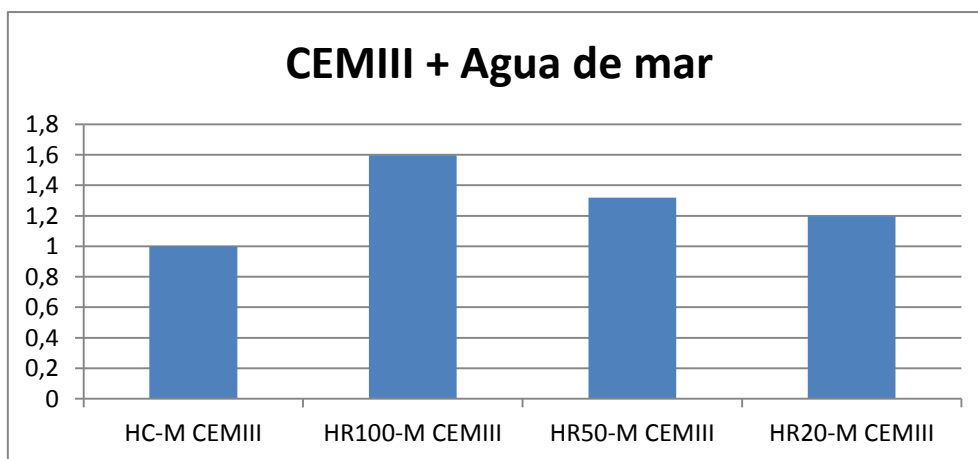


Gráfico 4.18. Comparativa de la absorción entre hormigón convencional y el hormigón reciclado con el CEMIII y agua de mar

De igual manera que en los anteriores puntos, se ha fijado un valor unitario a la capacidad de absorción al hormigón convencional de cada bloque, para hacer el estudio respecto a un valor patrón. Por lo tanto, se han expresado las absorciones de todos los hormigones respecto a su homólogo (hormigón de control) dentro de cada bloque.

La conclusión más evidente que se extrae de estas gráficas comparativas es que todos los hormigones fabricados con áridos reciclados tienen una mayor absorción que el hormigón convencional u hormigón de control. Además, cuanto más alto es la presencia de estos áridos reciclados en el hormigón, más acentuado es el incremento en la propiedad estudiada, característica observada ya en el apartado anterior.

Para dar una idea cuantitativa de esta primera conclusión, es interesante remarcar cómo aumenta la absorción entre los hormigones convencionales y los hormigones con un 100% de sustitución del árido. Si nos fijamos en esta comparativa obtenemos un incremento de la absorción en valores de porcentaje del 97,32% para CEMI y agua natural, un 77,7% para CEMI y agua de mar, un 61,79% para CEMIII y agua natural y un 68,78% para CEMIII y agua de mar. Por lo tanto, se concluye que el aumento de la absorción provocado por la utilización de áridos reciclados es significativo, puesto que en el caso de menor influencia ésta ha aumentado un 61,79%. Y en otro caso más significativo incluso, la capacidad de absorción casi se dobla, pasando de una capacidad de absorción del 2,98% para el HC-D CEM I al 5,88%, correspondiente al HR100-D CEM I.

4.3 PROPIEDADES MECÁNICAS

En este capítulo se han analizado las propiedades mecánicas de las diferentes tipologías de hormigones fabricados. Como ya se ha comentado en el respectivo capítulo de fase experimental, se ha considerado hacer el estudio de los hormigones convencionales y los hormigones con áridos reciclados. Concretamente, con porcentajes de sustitución de áridos del 20 %, 50% y 100%. Aun así, de cada uno de estos hormigones se han fabricado dos series, una con agua natural y la otra con agua de mar, con el objetivo de observar la influencia de esta última en las propiedades mecánicas de los hormigones.

Cómo en el caso del estudio de las propiedades físicas, se han detallado los resultados agrupándolos en tres subapartados: comportamiento del hormigón convencional, comportamiento del hormigón con áridos reciclados y comparativa entre hormigón convencional y reciclado.

Se recuerda que dentro de las propiedades mecánicas, el estudio se ha centrado en la resistencia a compresión, la resistencia a flexo-tracción y el módulo elástico. Los resultados de los ensayos se presentan con este mismo orden.

4.3.1 ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Para Realizar los ensayos a compresión se ha seguido la norma UNE-EN 12390-3. A continuación se expone una tabla donde se pueden ver las resistencias a compresión obtenidas en cada ensayo para cada tipo de hormigón. Para analizar más profundamente esta propiedad mecánica, el ensayo se ha realizado con probetas cúbicas y cilíndricas. Podemos ver en la tabla que las probetas cúbicas se han ensayado a 7 y 28 días mientras que las cilíndricas solo a 28 días. Posteriormente, debido a las dos remesas de áridos recibidas se creyó oportuno realizar una comparación de resistencias a 28 días para observar si el nuevo árido influía en la resistencia a compresión.

Tabla 4.4. Valores obtenidos de la resistencia a compresión para cada uno de los hormigones a 7 y 28 días y de las probetas cilíndricas de control

		Probetas cúbicas		Probetas cilíndricas	
		Compresión Media 7 Días (MPa)	Compresión Media a 28 Días (MPa)	Compresión Media a 28 Días (MPa) (Áridos 1)	*Compresión Media a 28 Días (MPa) (Áridos 2)
CEMI	HC-D	52,39	61,46	57,17	47,68
	HC-M	52,61	61,46	53,77	45,50
	HR100-D	26,48	32,82	30,50	28,92
	HR100-M	28,88	36,69	30,37	30,52
	HR50-D	39,56	48,82	39,92	_____
	HR50-M	42,50	50,16	45,21	_____
	HR20-D	44,10	49,49	43,97	_____
	HR20-M	47,11	50,41	40,91	_____
CEMIII	HC-D	45,35	57,51	51,38	55,56
	HC-M	48,27	64,32	57,73	58,74
	HR100-D	29,35	40,05	31,78	35,15
	HR100-M	29,53	40,46	39,11	38,42
	HR50-D	35,41	49,50	39,21	_____
	HR50-M	37,66	53,56	43,92	_____
	HR20-D	38,55	55,36	48,10	_____
	HR20-M	44,25	61,26	51,79	_____

*Los ensayos de las probetas cilíndricas de control con la segunda remesa de áridos solo se hicieron para comprobar que el árido nuevo no influía en las propiedades mecánicas, por eso solo se fabricar hormigones convencionales y con sustitución del 100% del árido grueso por árido reciclado mixto. Se observa que aunque hay variaciones en las resistencias a compresión, estas tanto son de incremento como de disminución por tanto se concluye que los diferentes tipos de áridos no afectan a las propiedades mecánicas.

Podemos observar en la tabla que los valores de las probetas cilíndricas son menores en su mayoría, éste es un resultado esperado que no tiene influencia en el estudio, las características de las probetas ya presuponen una pequeña caída de la compresión en probetas cilíndricas respecto a las cúbicas.

Seguidamente se hace un estudio completo de las resistencias a 7 y 28 días para analizar la influencia de los áridos reciclados en diferentes sustituciones sobre el árido natural y la influencia del agua dulce o agua de mar en la mezcla.

4.3.1.1 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL

En los siguientes gráficos se muestra una comparativa de las resistencias a 7 y 28 días de los diferentes hormigones convencionales. Diferenciando el tipo de cemento y de agua utilizada.

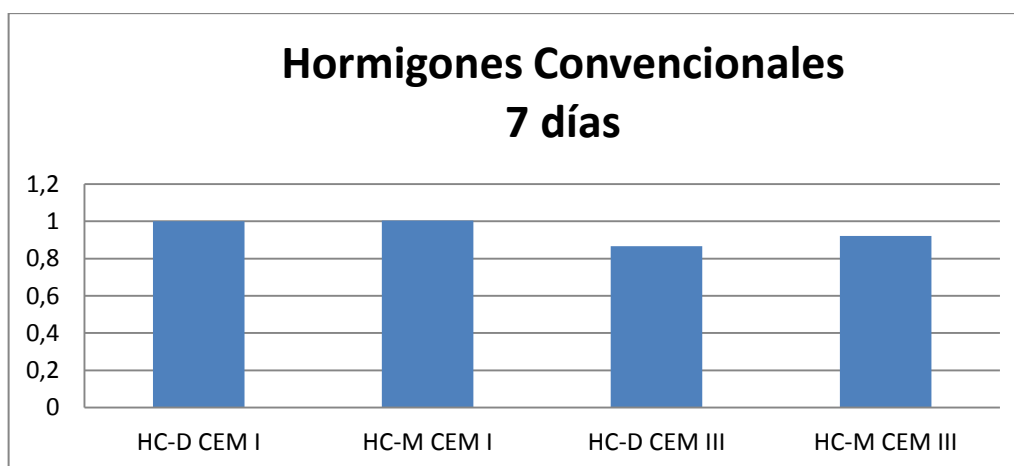


Gráfico 4.19. Comparativa de las resistencias a 7 días para los diferentes tipos de hormigones convencionales

En el gráfico podemos observar que la resistencia para el CEM I a 7 días no se ve muy alterada, es prácticamente la misma, no ocurre lo mismo con los hormigones fabricados con CEM III donde se aprecia un aumento de la resistencia que llega a ser del 6% la cual seguirá en aumento como podremos ver en los siguientes gráficos de resistencias a 28 días.

Por otro lado los hormigones fabricados con CEM I son los que tienen más resistencia a 7 días respecto a los fabricados con cemento tipo CEM III, con un aumento del 15,5% en los hormigones fabricados con agua dulce y del 9% en los hormigones fabricados con agua de mar.

Este hecho se debe a las diferentes composiciones de los cementos; el CEM I tiene más cantidad de Clinker, el cual reacciona con el agua formando los compuestos que aportan resistencia al hormigón (hidratos)

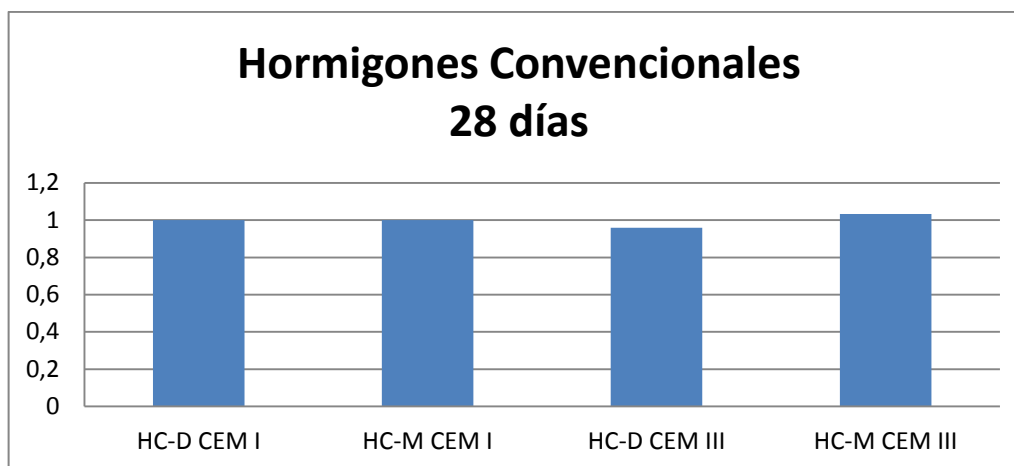


Gráfico 4.20. Comparativa de las resistencias a 28 días para los diferentes tipos de hormigones

En este caso, las resistencias a compresión de los hormigones con CEMI han sido las mismas, tanto en la fabricación con agua de mar como con agua marina. Ambas series de probetas han dado la misma resistencia, 61,46 N/mm².

En los hormigones fabricados con CEMIII sí existe una diferencia entre la fabricación con agua dulce y el agua de mar. El comportamiento es el mismo que a la edad de 7 días, los hormigones con agua de mar resultan más resistentes a compresión que los de agua natural. En este caso, la diferencia supone un porcentaje del 11,84 %.

Finalmente, analizando el gráfico anterior se puede observar como la mejor combinación de todas las variables estudiadas, en relación a la resistencia a compresión, es la fabricación con cemento tipo CEMIII y agua de mar. Por el contrario, la peor combinación, es decir, la que aporta una resistencia menor, es producida por la fabricación con CEMIII y agua dulce. Este hecho podría ser consecuencia, por un lado como ya se ha explicado, el CEM I contiene más Clinker y por tanto produce más hidratos que son los componentes resistivos del hormigón, y por otro lado, una posible influencia del agua de mar.

4.3.1.2. COMPORTAMIENTO DE LOS HORMIGONES CON ÁRIDOS RECICLADOS

En este apartado se pretende comparar la misma propiedad que en el apartado anterior, pero en este caso analizando la influencia de la sustitución de los áridos reciclados mixtos con diferentes porcentajes.

A continuación se pueden ver los gráficos comparativos de las resistencias a compresión a 7 y 28 días.



Gráfico 4.21. Comparativa resistencias a 7 días de los diferentes tipos de hormigones reciclados



Gráfico 4.22. Comparativa resistencias a 28 días de los diferentes tipos de hormigones reciclados

Se puede observar que la tendencia ha sido la esperada, a menos sustitución de árido natural mayor es la resistencia tanto para 7 días como para 28, esto es debido a que el árido reciclado mixto está formado por componentes de peor calidad y menor resistencia tal y como ya se ha expuesto en la caracterización de estos mismos en el anterior capítulo.

Por otro lado, en cada hormigón con igual porcentaje de sustitución del árido, se puede observar una mejora de la resistencia debido a la utilización del agua de mar en la fabricación.

Por lo tanto, se vuelve a confirmar el mismo efecto producido en los hormigones convencionales, el agua de mar provoca un aumento de resistencia respecto a los hormigones fabricados con agua dulce.

4.3.1.3. COMPARATIVA ENTRE HORMIGON CONVENCIONAL Y HORMIGON RECICLADO.

En este punto se compara el hormigón convencional y el hormigón fabricado con áridos reciclados mixtos. Con esta comparativa se pretende analizar cómo varían las resistencias entre los diferentes tipos de hormigones.

Para el análisis y siguiendo el esquema en las propiedades físicas se diferencian cuatro bloques según el tipo de cemento y el agua utilizada en la mezcla. Que a su vez se dividirán en dos partes para diferenciar las resistencias a 7 y 28 días como se ha hecho en todos los puntos.

- *Resistencias a 7 días*

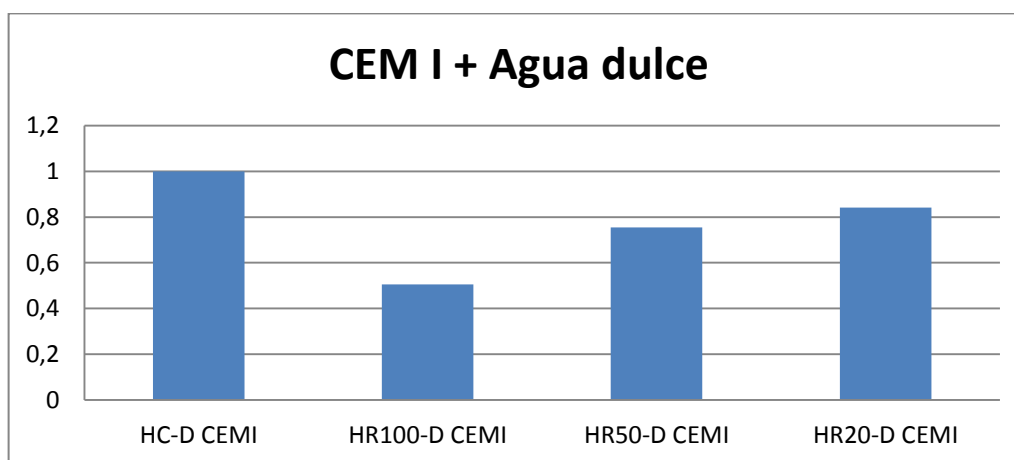


Gráfico 4.23. Comparativa resistencia a 7 días entre el hormigón convencional y el hormigón reciclado con CEMI y agua dulce

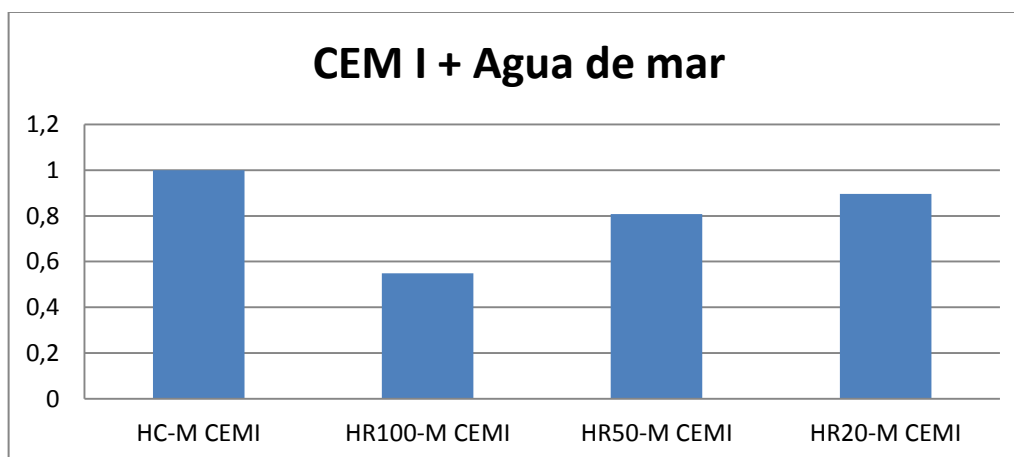


Gráfico 4.24. Comparativa resistencia a 7 días entre el hormigón convencional y el hormigón reciclado con CEMI y agua de mar

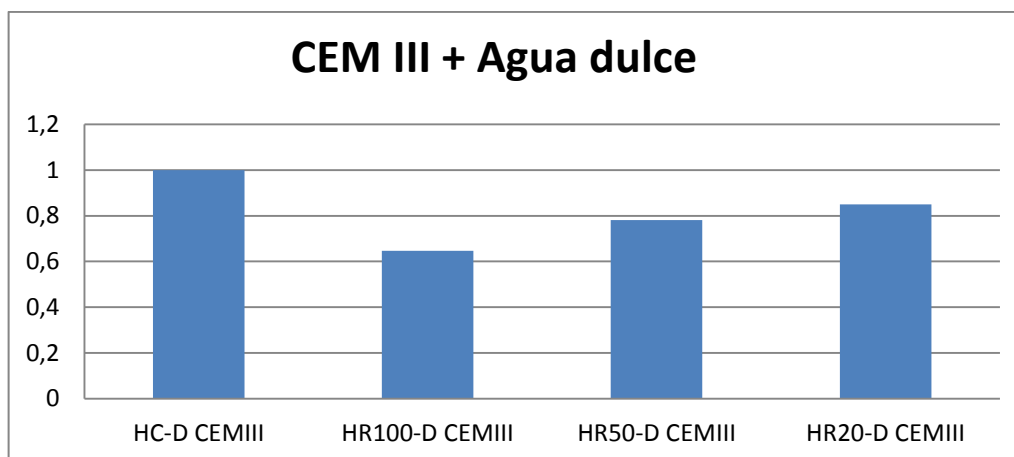


Gráfico 4.25. Comparativa resistencia a 7 días entre el hormigón convencional y el hormigón reciclado con CEMIII y agua dulce

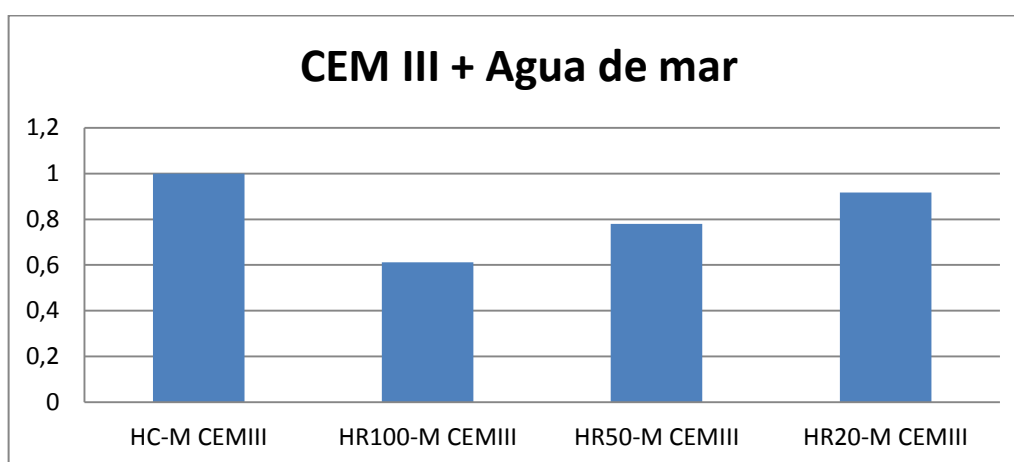


Gráfico 4.26. Comparativa resistencia a 7 días entre el hormigón convencional y el hormigón reciclado con CEMIII y agua de mar

Entre todos los gráficos expuesto e independientemente del tipo de cemento y del agua de la mezcla se observa como ya se venía esperando que existe una caída de la resistencia en los hormigones reciclados. Cabe destacar que con la sustitución del 100% la caída de resistencia puede llegar hasta el 50% de la resistencia del hormigón convencional como es el caso del HR100-D CEMI. En el caso de sustituir solo el 20% del árido grueso por árido reciclado la caída es mucho más leve, incluso en el HR20-M CEMIII es solo del 8% echo que podría ser muy importante de cara a las conclusiones del estudio.

También se observa una tendencia clara en cuanto a la relación de la caída de la resistencia y el tanto por ciento de sustitución de los áridos gruesos. Si sustituimos todos los áridos gruesos, la resistencia baja entre un 40%-50% mientras que si solo sustituimos la mitad de estos áridos la caída de resistencia oscila entre el 20%-25%.

- Resistencia a 28 días

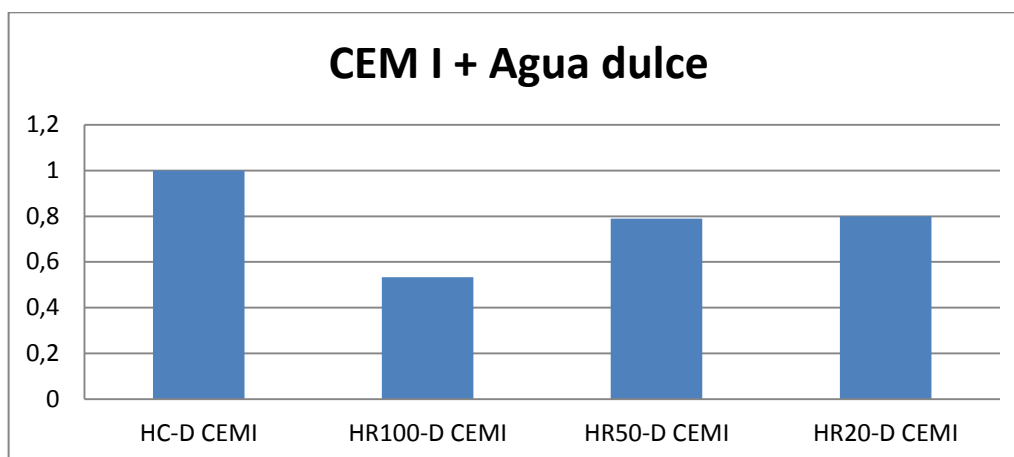


Gráfico 4.27. Comparativa resistencia a 28 días entre el hormigón convencional y el hormigón reciclado con CEMI y agua dulce

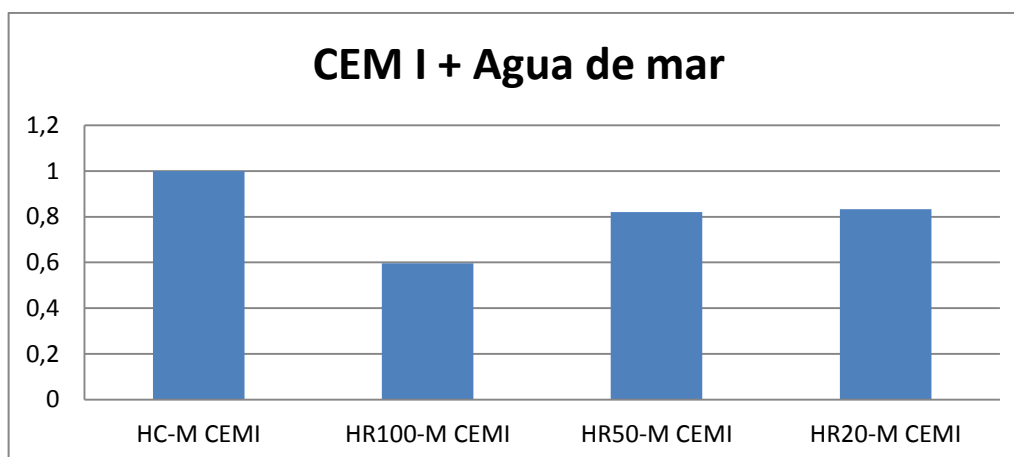


Gráfico 4.28. Comparativa resistencia a 28 días entre el hormigón convencional y el hormigón reciclado con CEMI y agua de mar

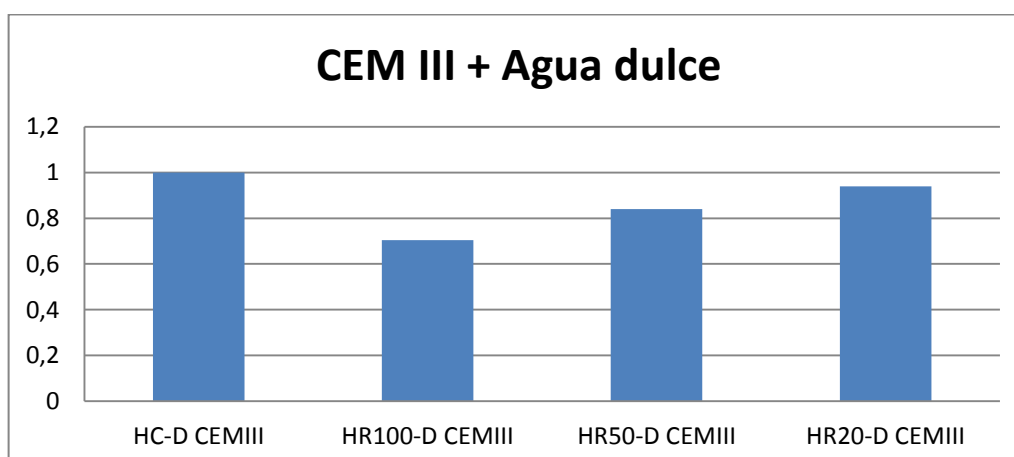


Gráfico 4.29. Comparativa resistencia a 28 días entre el hormigón convencional y el hormigón reciclado con CEMIII y agua dulce

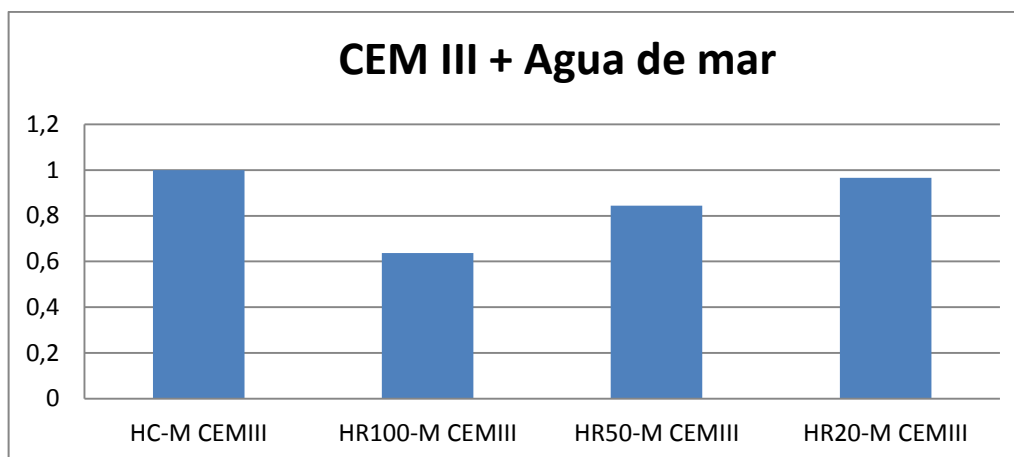


Gráfico 4.30. Comparativa resistencia a 28 días entre el hormigón convencional y el hormigón reciclado con CEMIII y agua de mar

En estos segundos gráficos podemos observar que la tendencia es parecida a los resultados obtenidos para resistencias a 7 días, el hormigón con menor resistencia respecto al convencional sigue siendo el HR100-D CEMI con una caída muy parecida a la anterior. Por otro lado el HR20-M CEM III sigue siendo el hormigón con menor caída, en esta caso, solo baja un 4% respecto a la resistencia del hormigón convencional. A diferencia de los ensayos a 7 días hay muy poca diferencia entre el HR20-M CEM III i el HR20-D CEM III lo cual puede suponer que el agua de mar tiene mucha influencia a corto plazo, aumentando la resistencia de los mismos hormigones realizados con agua de mar o agua dulce, pero que a largo plazo las resistencias podrían ser muy parecidas.

Cabe destacar que los hormigones realizados con CEM III tienen una menor caída en todos los hormigones fabricados durante el estudio, independientemente de si son realizados con agua de mar o agua dulce.

4.3.2 ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXO-TRACCIÓN

A continuación se muestran tabulados y en gráficas los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a flexo-tracción a 28 días. Para cada tipo de hormigón se han ensayado dos probetas prismáticas de dimensiones 10x10x40 cm. Para cada hormigón, los valores expresados a continuación han resultado de la media de ambas probetas.

Tabla 4.5. Valores obtenidos de la resistencia a flexo-tracción para cada uno de los hormigones a 28 días

		Resistencia media a flexo-tracción (MPa)
CEMI	HC-D	5,89
	HC-M	5,09
	HR100-D	4,90
	HR100-M	5,10
	HR50-D	6,26
	HR50-M	6,53
	HR20-D	4,27
	HR20-M	4,40
CEMIII	HC-D	5,70
	HC-M	6,03
	HR100-D	6,01
	HR100-M	6,42
	HR50-D	6,55
	HR50-M	6,66
	HR20-D	5,13
	HR20-M	5,45

De los resultados obtenidos se concluye que todos los hormigones son aptos para la construcción de pavimentos portuarios ya que todos superan los 4 MPa de resistencia a flexo-tracción exigida por el Pliego de Prescripciones Técnicas del Puerto de Barcelona.

Cabe decir que la resistencia a flexo-tracción depende de la adherencia entre la pasta de cemento y los áridos, por tanto es normal que con áridos reciclados la resistencia suba puesto que estos son más adherentes que los naturales.

Por otro lado, el ensayo de flexo-tracción se ha realizado con dos probetas, hecho que supone una posible dispersión entre los resultados.

4.3.2.1 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL

En el siguiente gráfico se muestra una comparativa de las resistencias a 28 días de los diferentes hormigones convencionales, diferenciando en cada gráfico el tipo de cemento y agua utilizados.

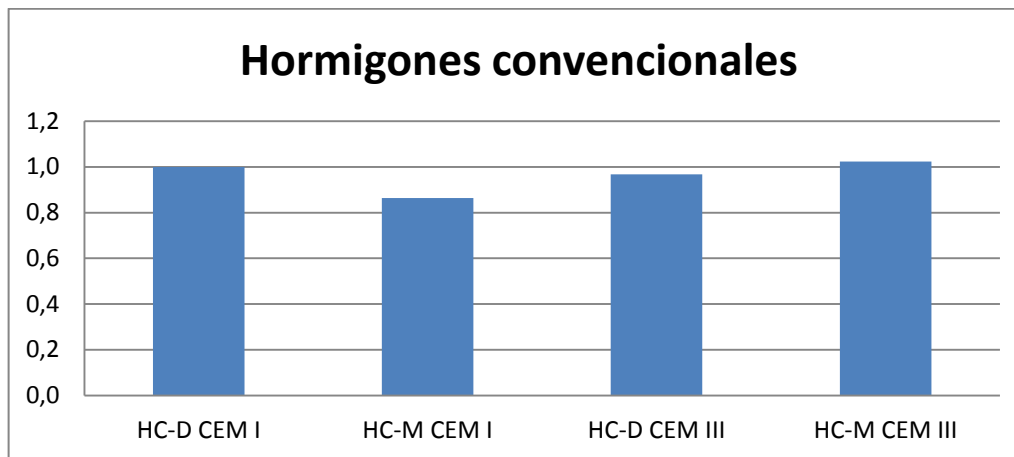


Gráfico 4.31. Comparativa de la resistencia a flexo-tracción de los diferentes tipos de hormigones convencionales.

En este gráfico se puede observar como existe un comportamiento diferenciado entre los hormigones con CEMI y con CEMIII. En los primeros, la utilización de agua de mar produce una bajada en la resistencia, mientras que en el CEMIII, produce un incremento de la misma.

Por otro lado, la diferencia de resistencias entre los hormigones fabricados con CEMI y CEMIII es mínima (diferencia próxima al 3 %), por lo tanto, se puede considerar que ambos trabajan igual en flexo-tracción.

4.3.2.2 COMPORTAMIENTO DE LOS HORMIGONES CON ÁRIDOS RECICLADOS

A continuación, se han analizado las resistencias a flexo-tracción en los hormigones fabricados con un tanto por ciento de sustitución de áridos reciclados. Estos resultados se muestran en el siguiente histograma, donde en el eje de abscisas se dispone la nomenclatura de cada hormigón y en el eje de ordenadas, la resistencia con Mpa.

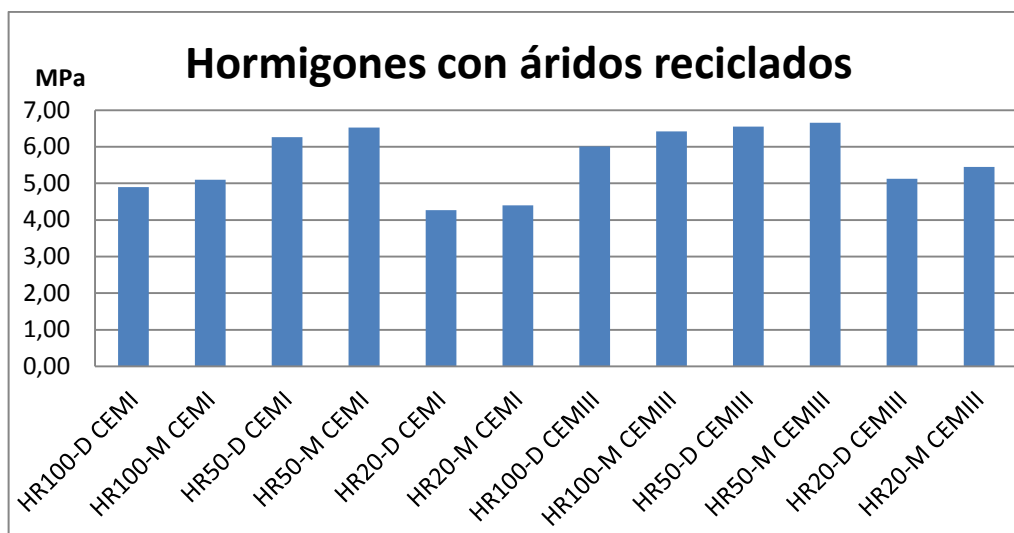


Gráfico 4.32. Comparativa de la resistencia a flexo-tracción de los diferentes tipos de hormigones reciclados.

Observando los datos expuestos en el anterior histograma, se puede ver que los hormigones fabricados con una sustitución del 50% de áridos reciclados son los que tienen mayor resistencia a flexo-tracción tanto para los hormigones fabricados con cemento tipo CEM I o CEM II. Como ya se ha expresado en el inicio de este punto, la resistencia a flexo-tracción es consecuencia de la adherencia entre la pasta de cemento y los áridos, por lo tanto se intuye que una mayor o menor sustitución de áridos naturales por áridos reciclados mixtos no tienen por qué mejorar o empeorar dicha resistencia.

Por otro lado, sí se cumplen con las expectativas del comportamiento de los hormigones fabricados con agua de mar, es decir, los resultado esperados coinciden con los obtenidos en el ensayo. Fijando cada par de hormigones con igual porcentaje de sustitución de árido reciclado, se observa como los fabricados con agua marina dan una resistencia a flexo-tracción mayor que los fabricados con agua natural.

En este caso pero, los hormigones con CEMIII proporcionan unas resistencias superiores a los fabricados con CEMI.

4.3.2.3 COMPARATIVA ENTRE HORMIGÓN CONVENCIONAL Y HORMIGÓN RECICLADO

A continuación se muestran en diferentes gráficos una comparación de la resistencia a compresión entre el hormigón convencional y los diferentes hormigones reciclados. Cada gráfico representa esta comparativa según el tipo de cemento y agua utilizados.

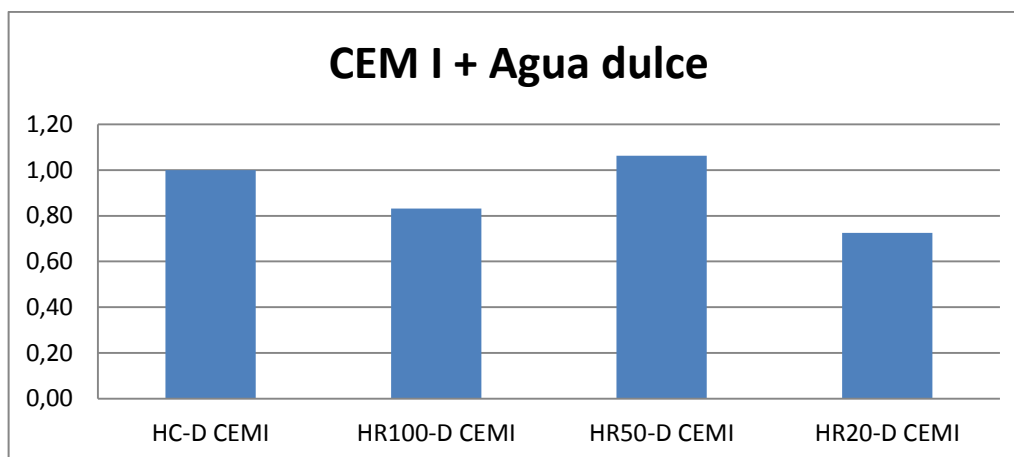


Gráfico 4.32. Comparativa de la resistencia a flexo-tracción entre el hormigón convencional i el hormigón reciclado con CEMI y agua natural

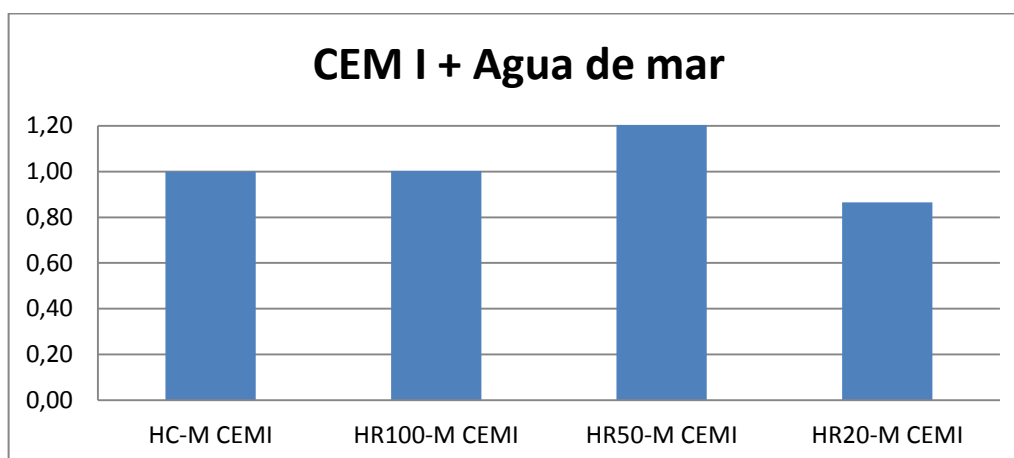


Gráfico 4.33. Comparativa de la resistencia a flexo-tracción entre el hormigón convencional i el hormigón reciclado con CEMI y agua de mar

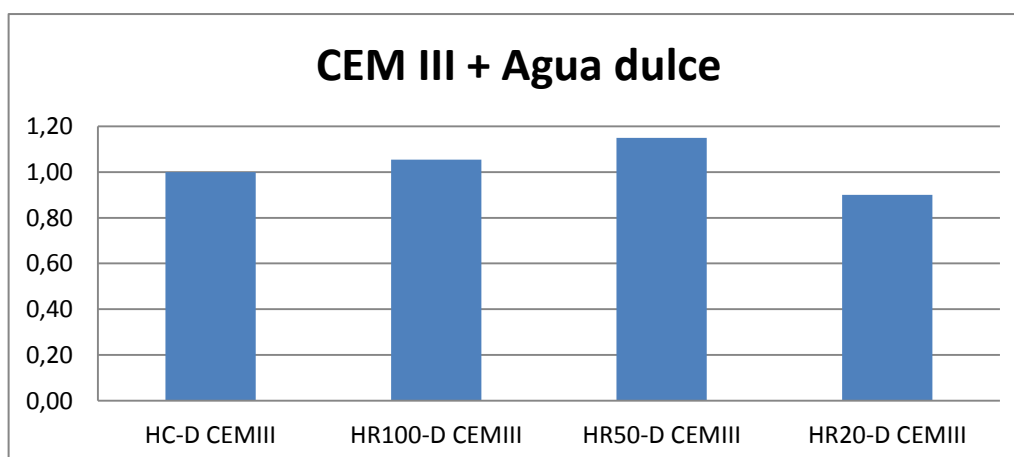


Gráfico 4.34. Comparativa de la resistencia a flexo-tracción entre el hormigón convencional i el hormigón reciclado con CEMIII y agua natural

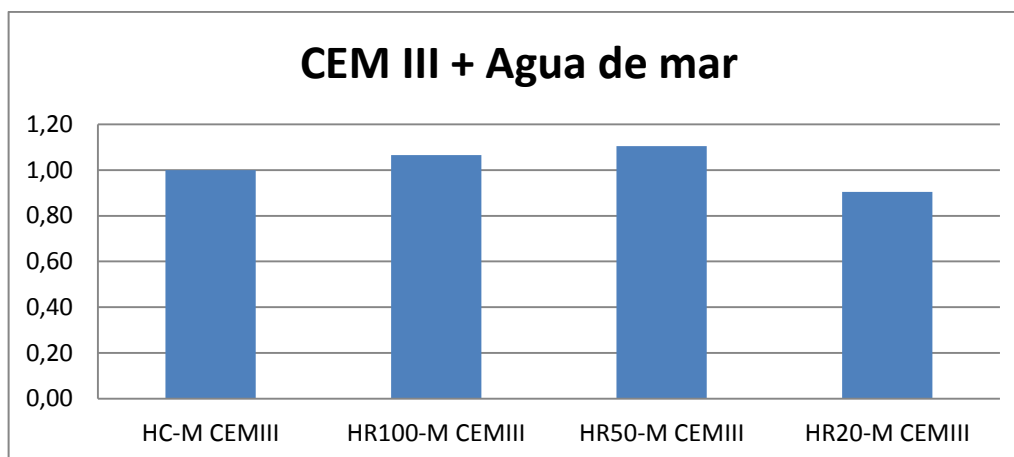


Gráfico 4.35. Comparativa de la resistencia a flexo-tracción entre el hormigón convencional i el hormigón reciclado con CEMIII y agua dulce

En este caso se observa como los hormigones fabricados con áridos reciclados resultan con resistencias más elevadas que los hormigones convencionales. Este comportamiento entra en conflicto con las conclusiones extraídas en el apartado anterior, donde se ha visto que a más proporción de árido reciclado presente en el hormigón, menos resistencia aportaban en las mediciones.

Por otro lado, se vuelve a confirmar el error de medida en el ensayo de los hormigones fabricados con un 20 % de áridos reciclados, puesto que estos tendrían que superar la resistencia de los hormigones elaborados con porcentajes mayores de sustitución.

Finalmente se concluye con que el porcentaje de sustitución no influye en la resistencia a flexo-tracción puesto que esta resistencia depende de la adherencia de los áridos con la pasta de cemento.

4.3.3 MÓDULO ELÁSTICO

Para la realización de éste ensayo se ha seguido la norma UNE 83316. El análisis de los datos se dividirá en tres partes siguiendo el guión de los otros ensayos, para así observar la influencia del agua de mar y de los áridos reciclados mixtos con diferentes sustituciones sobre el árido natural. A continuación se exponen los resultados obtenidos para cada tipo de hormigón:

Tabla 4.5. Valores obtenidos del módulo elástico para cada uno de los hormigones a 28 días

		Media Módulo Elástico (Mpa)
CEMI	HC-D	38268,50
	HC-M	40157,00
	HR100-D	22085,50
	HR100-M	24535,50
	HR50-D	31012,50
	HR50-M	31258,50
	HR20-D	32641,50
	HR20-M	34563,50
CEMIII	HC-D	37212,50
	HC-M	42284,50
	HR100-D	27004,00
	HR100-M	27377,50
	HR50-D	33002,50
	HR50-M	34451,50
	HR20-D	35950,50
	HR20-M	37563,00

En esta tabla observamos que los módulos elásticos mayores se dan en los hormigones convencionales, no se aprecia una gran diferencia entre los tipos de cemento, aunque se podría decir que en el CEM III hay un pequeño aumento de esta propiedad mecánica.

Más concretamente si nos fijamos en las parejas de hormigones con la misma sustitución de árido reciclado se puede observar un crecimiento del módulo elástico para todos los hormigones fabricados con agua de mar, hecho que se analizará en los siguientes puntos.

4.3.3.1 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL

En este apartado se pretende analizar el efecto del agua de mar sobre los hormigones convencionales, se presenta por tanto un gráfico donde podemos observar la variación del módulo elástico respecto al hormigón convencional fabricado con agua dulce.

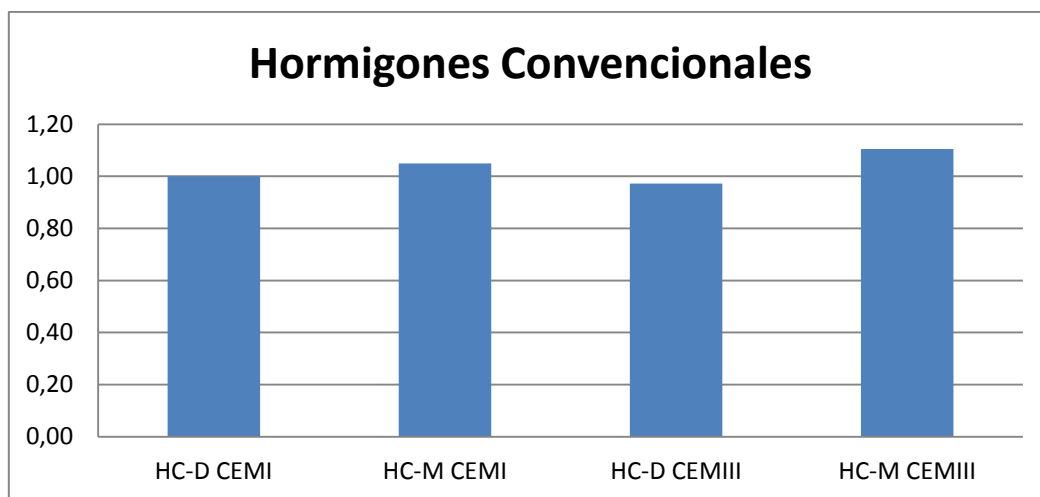


Gráfico 4.35. Comparativa del módulo elástico de los diferentes tipos de hormigones convencionales.

Se analizan los hormigones dos a dos comparando el de agua de mar con su respectivo de agua dulce, diferenciando CEM I y CEM III.

Tal y como se ha observado en la primera tabla, el agua de mar mejora la propiedad mecánica de los hormigones convencionales, el aumento es más pronunciado en el CEM III llegando a mejorar casi en un 15% mientras que en el CEM I la subida sólo llega al 5%.

4.3.3.2 COMPORTAMIENTO DE LOS HORMIGONES CON ÁRIDOS RECICLADOS

Para analizar el comportamiento de los áridos reciclados se hace un gráfico donde se observan los valores de los módulos elásticos para cada par de hormigones fabricados con árido reciclado mixto, comparando así la influencia de las diferentes sustituciones por árido natural.



Gráfico 4.36. Comparativa del módulo elástico de los diferentes tipos de hormigones convencionales.

La tendencia que se observa en el gráfico es la misma que en los anteriores puntos de propiedades mecánicas, si disminuimos el porcentaje de sustitución, el módulo elástico

aumentara linealmente a causa del bajo módulo elástico de los áridos reciclados en comparación con los naturales.

Además se observa que hay una gran diferencia entre la sustitución máxima y mínima realizada en este estudio, del 100% y del 20% respectivamente, llegando a aumentos del 30% de esta propiedad para los hormigones con un 20 % de sustitución.

4.3.3.3 COMPARATIVA ENTRE HORMIGÓN CONVENCIONAL Y HORMIGÓN RECICLADO

En este apartado se comparan los hormigones reciclados respecto a los convencionales. Dividiremos en cuatro bloques para analizar exclusivamente la influencia de los áridos reciclados, de esta manera se comparan todos los hormigones respecto al convencional, ya sea con agua de mar o agua dulce, CEM I o CEM III.

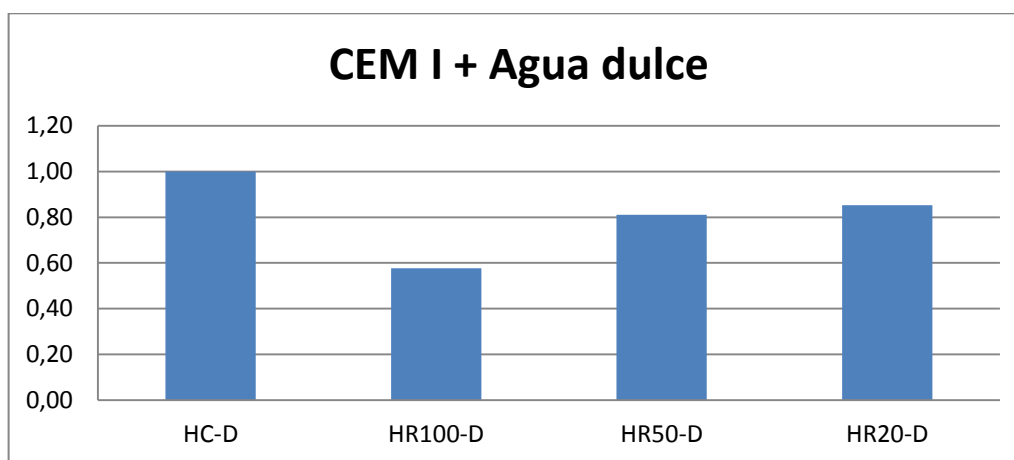


Gráfico 4.37. Comparativa del módulo elástico entre el hormigón convencional i el hormigón reciclado con CEM I y agua dulce

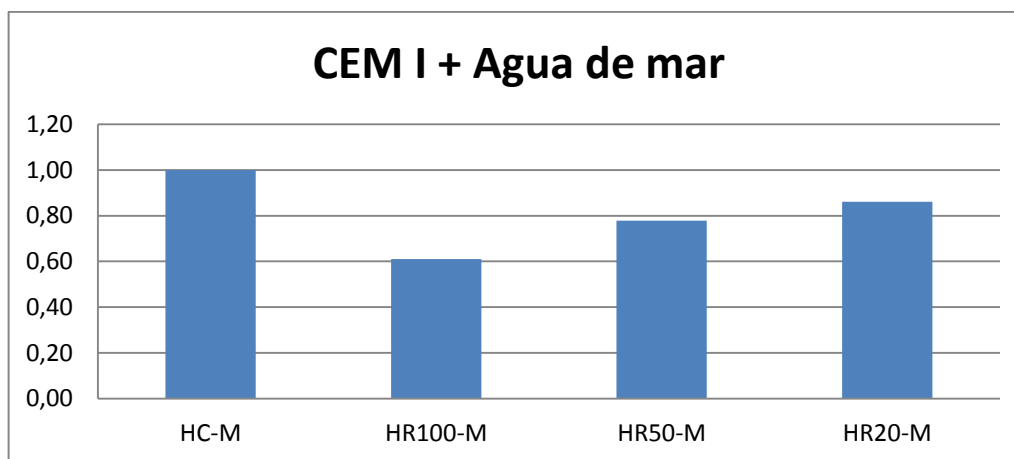


Gráfico 4.38. Comparativa del módulo elástico entre el hormigón convencional i el hormigón reciclado con CEM I y agua de mar

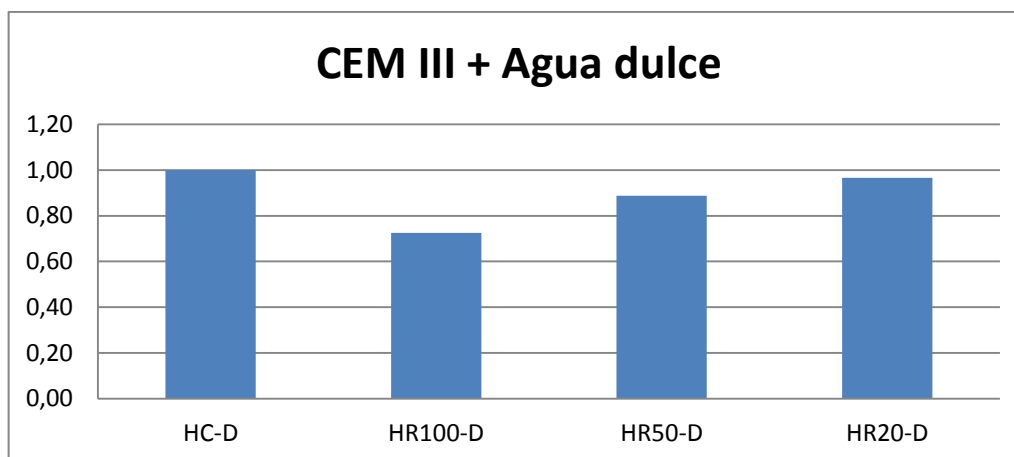


Gráfico 4.39. Comparativa del módulo elástico entre el hormigón convencional i el hormigón reciclado con CEM III y agua dulce

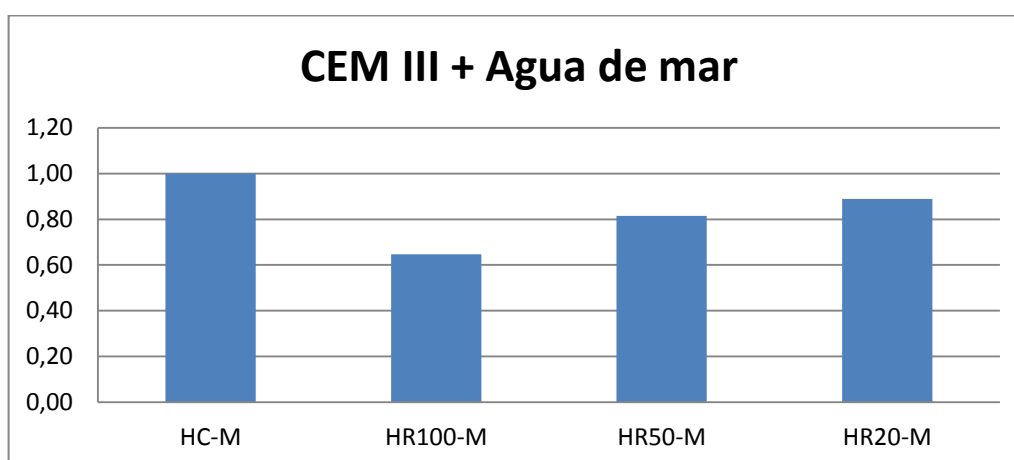


Gráfico 4.40. Comparativa del módulo elástico entre el hormigón convencional i el hormigón reciclado con CEM III y agua de mar

En los cuatro gráficos se puede ver que ninguna sustitución de árido reciclado mixto hace mejorar esta propiedad del hormigón respecto al hormigón convencional de control. Por tanto se concluye que los áridos reciclados producen un descenso del módulo elástico.

Numéricamente se observa que una sustitución del 100% de los áridos gruesos por áridos reciclados produce una caída del módulo elástico, que en el HR100-D CEM I llega a ser superior al 40%. Por otro lado se observa que los hormigones fabricados con el 20% de sustitución se acercan mucho al módulo elástico de su hormigón patrón, que en el caso de HR20-D CEM III la diferencia es solo del 3% es decir, mínima.

Por último se observa un comportamiento parecido entre el cemento tipo CEM I y CEM III, aunque los hormigones fabricados con CEM III tienen una menor caída del módulo elástico, ésta no es significativa.

4.4. TIEMPO DE FRAGUADO

El tiempo de fraguado se analiza para ver el comportamiento del hormigón fresco. El inicio del fraguado para los hormigones con estos tipos de cemento empieza cuando la resistencia alcanza los 3,5 Mpa y finaliza cuando la resistencia llega a 27,6 Mpa de acuerdo con el ensayo de fraguado en la ASTM C403

A diferencia de los apartados anteriores en este ensayo solo se han ensayado hormigones convencionales y hormigones con sustitución del 100% del árido natural grueso por áridos reciclados mixtos realizados con agua de mar y agua dulce. Consecuentemente se analizará este ensayo dividiéndolo en dos bloques, analizando la influencia del agua de mar y de los áridos reciclados sobre esta propiedad. Primero se hará un análisis de los hormigones fabricados con CEM I y posteriormente se analizarán los del CEM III.

En los gráficos presentados observaremos dos líneas horizontales que nos marquen el inicio y final de fraguado y las curvas para cada hormigón fabricado con el mismo cemento, puesto que en este ensayo se analiza el tiempo que transcurre entre el inicio y el final del fraguado.

Primero se analizarán los hormigones fabricados con CEM I.

- CEM I

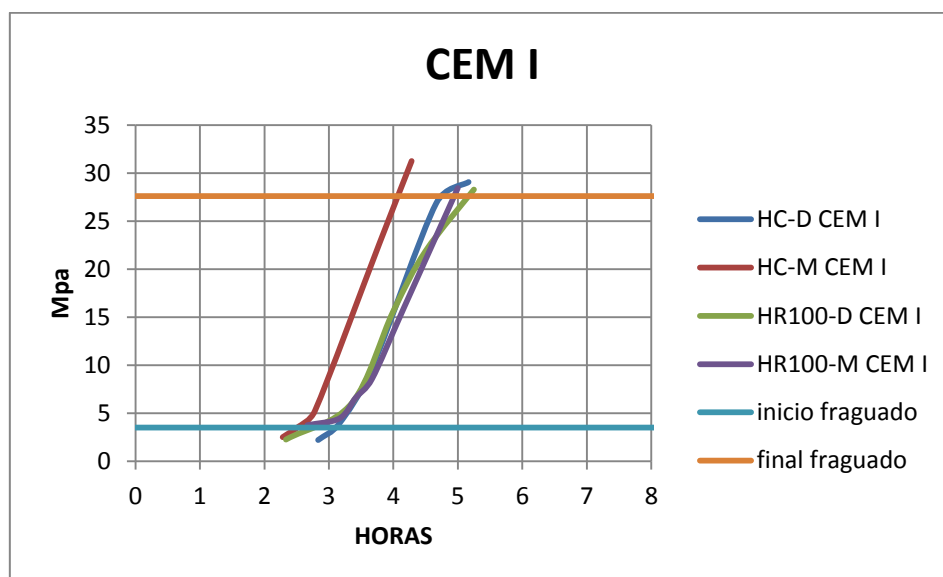


Gráfico 4.41. Comparativa tiempo de fraguado de los hormigones fabricados con CEM I

En el gráfico anterior se observa como los hormigones fabricados con agua de mar en la mezcla, alcanzan antes tanto el inicio como el final de fraguado; claramente se puede ver la diferencia entre los hormigones convencionales en los que llega a ser de más de media hora; no es así en los hormigones reciclados donde las diferencias se ajustan mucho más. Por lo tanto los hormigones con agua de mar fraguan con mayor rapidez que los fabricados con agua dulce convencional, debido a que las sales disueltas están compuestas en su mayoría de cloruros, un compuesto que puede acelerar el tiempo de fraguado.

Por otro lado observamos que el hormigón convencional fabricado con agua dulce, aun iniciando el fraguado más tarde que los dos reciclados, alcanza la resistencia final de fraguado antes que estos. Esto es debido a que el tiempo de fraguado, desde que alcanza los 3,5 MPa hasta los 27,6 MPa, para los hormigones reciclados es de una hora más que para los convencionales; este fenómeno se da a causa de la capacidad de absorción de los áridos reciclados mixtos, que absorben mucha agua durante la fabricación del hormigón y que van soltando cuando el hormigón va fraguando, haciendo retardar el endurecimiento de éste. Otra explicación a este fenómeno es la presencia de yesos en la composición de los áridos reciclados mixtos, el yeso es un compuesto que hace retardar el tiempo de fraguado puesto que retrasa la formación del aluminato cálcico hidratado, uno de los compuestos que da resistencia al hormigón[54]

A continuación se analizarán los hormigones fabricados con CEM III.

- CEM III

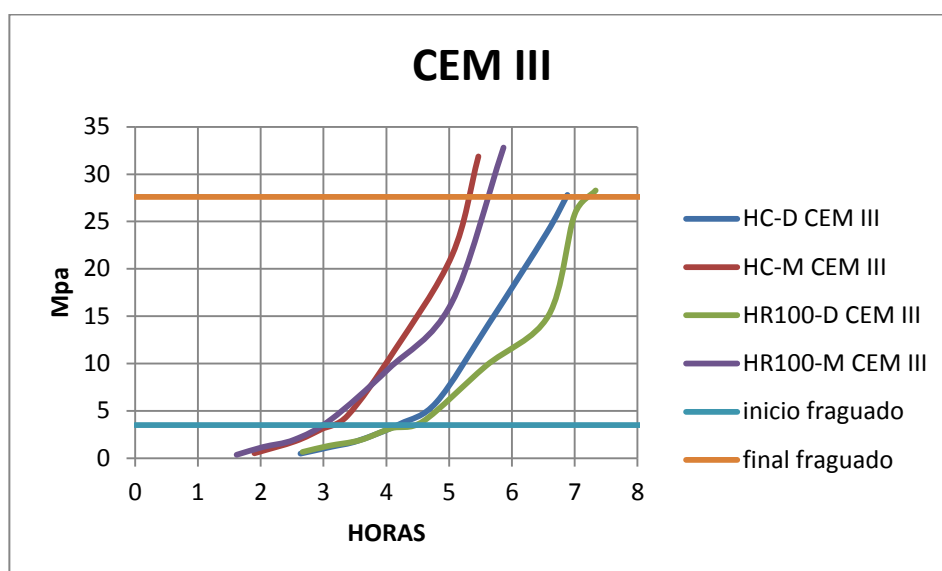


Gráfico 4.42. Comparativa tiempo de fraguado de los hormigones fabricados con CEM III

En este segundo gráfico del tiempo de fraguado se pueden observar más claramente los resultados extraídos en el análisis del CEM I. Los hormigones fabricados con agua de mar son los primeros en iniciar el fraguado, que si los comparamos entre ellos se puede ver que el reciclado inicia antes el fraguado aunque alcanza más tarde la resistencia de 27,6 MPa, dejando a ver que el tiempo de fraguado es menor para los hormigones convencionales, ya que sus áridos no tienen tanta agua absorbida. Lo mismo ocurre con los hormigones fabricados con agua dulce donde el inicio es muy similar para los dos pero que en el final de fraguado hay una diferencia de casi media hora.

De los dos gráficos expuestos podemos concluir que el agua de mar acelera el fraguado del hormigón y que los áridos reciclados lo ralentizan, como lo corrobora el hormigón más rápido en fraguar (HC-M CEM I) y el hormigón más lento en fraguar (HR100-D CEM III).

De este análisis también podemos extraer que para los hormigones fabricados con CEM I los tiempos de fraguado son menores en comparación con los de CEM III.

Seguidamente se muestra una tabla donde se pueden ver los resultados obtenidos. En la tabla se muestran las horas desde la fabricación del hormigón hasta el inicio y final de fraguado así como el intervalo de tiempo entre el inicio y final.

Tabla 4.6. Valores obtenidos del inicio, final y tiempo de fraguado para todos los hormigones

		Inicio de fraguado	Final de fraguado	Tiempo de fraguado
CEMI	HC-D	3,08	4,83	1,75
	HC-M	2,51	4,07	1,56
	HR-D	2,67	5,17	2,50
	HR-M	2,49	4,94	2,45
CEMIII	HC-D	4,17	6,87	2,69
	HC-M	3,09	5,30	2,20
	HR-D	4,31	7,24	2,93
	HR-M	2,96	5,60	2,64

En esta la tabla podemos observar de forma numérica los resultados de los gráficos vistos anteriormente. Como ya se ha dicho, el ensayo del tiempo de fraguado se hace para analizar las características del hormigón en fresco; otro ensayo posible es el de las retracciones, concretamente el de retracción plástica el cual se analiza en el siguiente punto.

El tiempo final de fraguado guarda relación con el instante a partir del cual las variaciones de las retracciones plásticas dejan de ser tan importantes, puesto que es en ese instante en el que ya se han hidratado todos los compuestos y el hormigón ya ha fraguado. En el siguiente punto se analizará más profundamente la relación existente entre estos dos ensayos, una vez se hayan expuesto los análisis de retracción plástica.

4.5. RETRACCIONES

En este apartado se han estudiado los resultados obtenidos en el ensayo de retracciones. Como ya se ha comentado en el capítulo correspondiente a la fase experimental, se han analizado tres tipos de retracciones, retracción plástica, autógena y de secado. El análisis se realiza según este orden, empezando con la explicación de los resultados de la retracción plástica.

4.5.1 RETRACCIÓN PLÁSTICA

El ensayo de retracción plástica analiza las propiedades del hormigón fresco tal y como ya se ha comentado en el anterior punto, por lo tanto los resultados de este ensayo se obtienen durante las primeras 24 horas.

Primero se hará un análisis con gráficos de los resultados obtenidos durante las primeras 24 horas, y posteriormente un análisis con gráficos de las primeras 6 horas donde se producen las variaciones más importantes y así poder analizar mejor y poder comparar con el ensayo de tiempo de fraguado. Los gráficos muestran las microdeformaciones (μdef (10^{-6})) en función del tiempo en horas.

Como en el anterior punto se analizan por separado los hormigones fabricados con CEM I y CEM III.

- CEM I

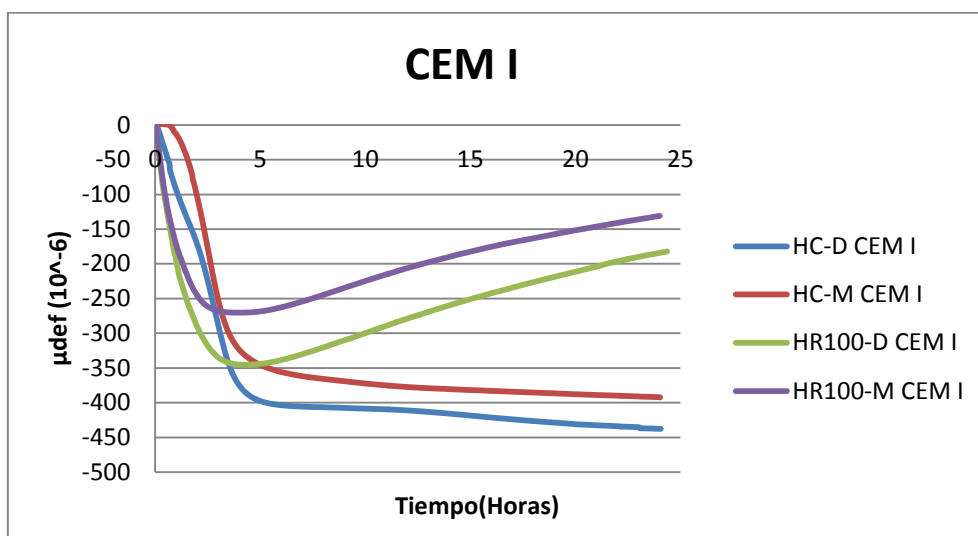


Gráfico 4.43. Comparativa retracciones plásticas de los hormigones fabricados con CEM I

En el gráfico se observa que durante aproximadamente las primeras cinco horas se producen las retracciones más importantes, desde ese instante los hormigones convencionales siguen una tendencia casi horizontal aunque no deja de aumentar la deformación pero con una variación poco importante, en cambio los hormigones reciclados, llegados a ese instante la retracción disminuye un poco y empieza a estabilizarse. Esto se debe a la capacidad de

absorción de los áridos reciclados mixtos que al tener agua absorbida, van aportando agua a la pasta de cemento favoreciendo así la reducción de retracción plástica

También se puede observar como son los hormigones reciclados los que tienen unas deformaciones más pronunciadas al inicio del ensayo pero en cambio son los hormigones convencionales los que sufren las deformaciones mayores, por tanto podemos decir que los áridos reciclados sufren menores retracciones que los convencionales.

Por otro lado se observa que los hormigones fabricados con agua de mar, si se comparan con el mismo hormigón pero fabricado con agua dulce, siguen idéntica tendencia pero con microdeformaciones menores, así pues también se puede decir que el agua de mar hace mejorar esta propiedad debido a que las abundantes sales disueltas en el agua de mar hacen que haya menos agua libre como material continuo que con el agua dulce, y por tanto menos evaporación de agua, causando así menos retracción plástica.

- CEM III

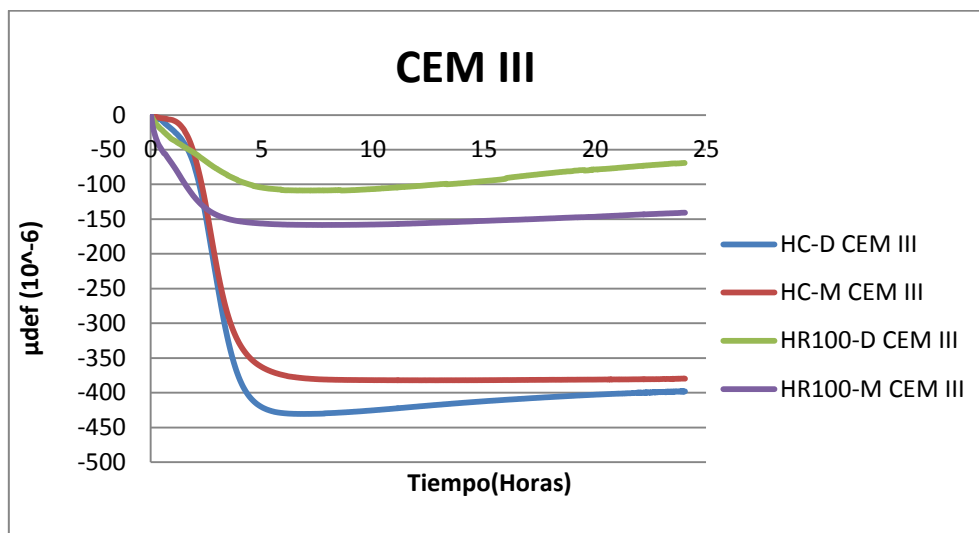


Gráfico 4.44. Comparativa retracciones plásticas de los hormigones fabricados con CEM III

En el gráfico de los hormigones fabricados con CEM III la tendencia es muy parecida a los del CEM I, como viene siendo normal en la mayoría de ensayos. En este caso podemos ver mucho más diferenciadas las deformaciones entre los hormigones convencionales y los reciclados.

Igual que en el anterior gráfico del CEM I, los hormigones con áridos reciclados mixtos sufren mayor deformación en los instantes iniciales aunque sin llegar a producir retracciones muy significativas y seguidamente se estabilizan; al contrario que los hormigones convencionales que sufren unas deformaciones muy importantes durante las cinco primeras horas para luego estabilizarse. Otra vez se observa la influencia de los áridos reciclados, y el aporte de agua adicional que dan a la pasta de cemento reduciendo el efecto de la retracción plástica.

Solo cabe destacar que en los hormigones reciclados fabricados con CEM III, es la única pareja de hormigones donde el fabricado con agua dulce produce menor deformación. Tal y como se

ha comentado anteriormente, podría ser que al agua de mar mejorase esta propiedad, con la excepción de este hormigón, aunque las diferencias son casi inapreciables.

Por último, si se observan los dos gráficos de retracción plástica, se puede ver una gran diferencia entre la retracción de los hormigones con áridos reciclados fabricados con CEM I o CEM III, la explicación a este fenómeno se da a causa de la humedad de los áridos reciclados antes de la fabricación del hormigón. Como se ha explicado en la fase experimental antes de cada hormigonada se humedecían los áridos y se calculaba la humedad correspondiente. En este caso hubo una diferencia de 0.5% de humedad entre los áridos para la fabricación del hormigón con CEM I y CEM III, siendo mayor la del segundo. Ésta diferencia provocó que en los hormigones fabricados con CEM III, al tener más humedad, la absorción inicial es menor y por lo tanto la retracción inicial es menor como se puede observar en los gráficos y se podrá analizar mejor en los siguientes gráficos.

En los siguientes gráficos se analizarán las seis primeras horas de este ensayo puesto que es donde se producen las deformaciones importantes y seguidamente se hará una comparativa con el tiempo e fraguado. Se presentan los dos gráficos de CEM I y CEM III conjuntamente para su posterior análisis.

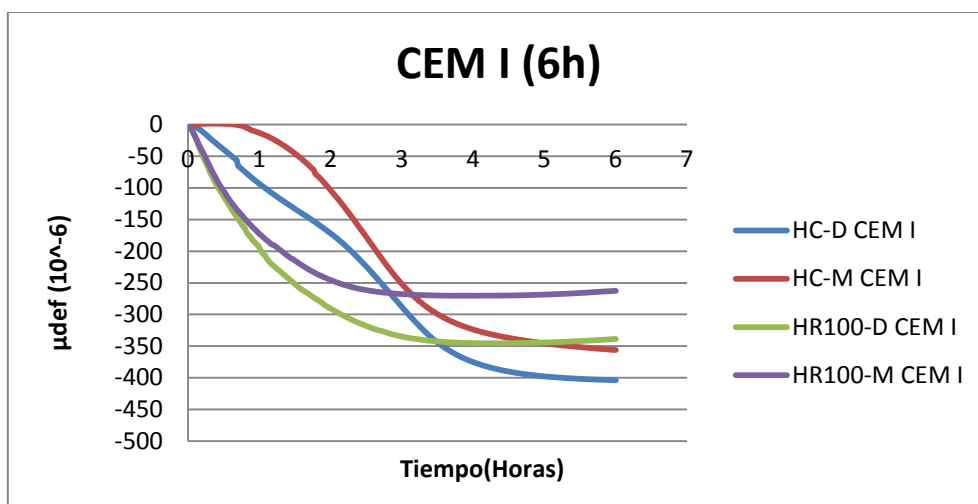


Gráfico 4.45. Comparativa retracciones plásticas de las primeras 6 horas para los hormigones fabricados con CEM I

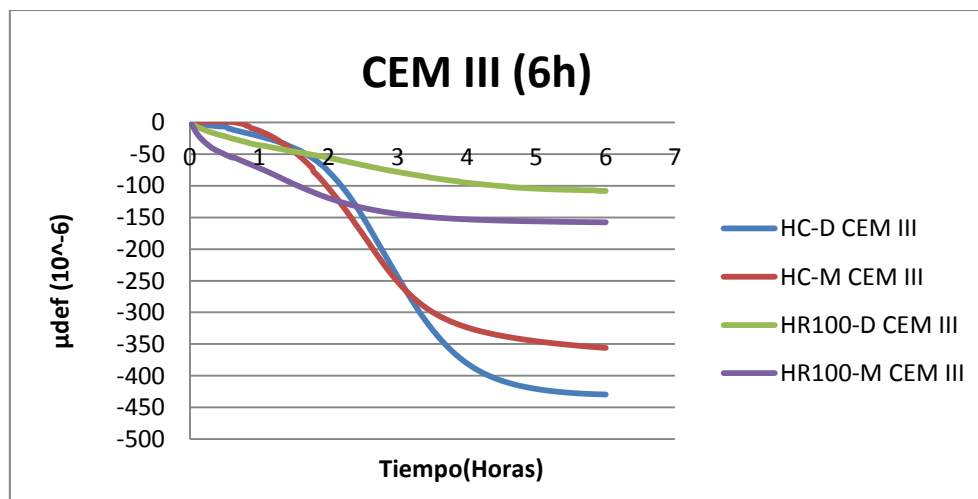


Gráfico 4.46. Comparativa retracciones plásticas de las primeras 6 horas para los hormigones fabricados con CEM III

Observando los dos gráficos conjuntamente se puede ver como de importantes son las primeras horas, donde se producen las deformaciones más importantes para luego estabilizarse y seguir una tendencia paralela para todos los hormigones.

Se observa que los áridos reciclados influyen más con el tipo de cemento CEM III haciendo que las diferencias entre reciclados y convencionales sean mucho más amplias que en los hormigones fabricados con CEM I. Como se ha comentado anteriormente, en estos gráficos se observan las diferentes pendientes que hay entre los hormigones reciclados fabricados con CEM I o CEM III donde se puede apreciar que la retracción inicial de los hormigones fabricados con CEM III, es tres veces mayor a la retracción inicial de los otros.

Se puede ver claramente lo anteriormente explicado; los hormigones reciclados padecen una deformación inicial mientras que los convencionales no empiezan a sufrir deformaciones hasta aproximadamente la primera hora posterior a su fabricación. Es cuando, los hormigones convencionales empiezan a padecer retracciones muy pronunciadas alcanzando valores de -400, -450 μdef .

Finalmente podemos concluir con la relación existente entre tiempo final de fraguado desde la fabricación de los hormigones y los instantes en los cuales los mismos tipos de hormigón alcanzan una tendencia horizontal (dejan de sufrir retracciones significativas).

Una de las diferencias entre estos dos últimos gráficos es que en los hormigones fabricados con CEM I se alcanza antes la tendencia horizontal, con lo cual el tiempo final de fraguado debería ser menor a los de CEM III, hecho que se puede comprobar en la tabla 4.6. del tiempo de fraguado expuesta en el anterior punto. Si se analizan uno por uno todos los hormigones comparando el tiempo final de fraguado y los instantes donde la curvatura de las gráficas de retracción plástica empieza a coger una tendencia horizontal, se puede observar una correlación entre todos los hormigones.

4.5.2 RETRACCIÓN AUTÓGENA

Como ya se ha comentado en la introducción de este capítulo, la explicación de este ensayo se ha separado en el comportamiento del hormigón fabricado con CEMI y el fabricado con CEMIII. Además, se ha realizado un análisis a 28 días y otro más detallado, mostrando los resultados de las primeras 48 horas.

Hay que destacar que los resultados se han expresado en unidades de microdeformaciones. Estas han resultado exclusivamente consecuencia de las reacciones químicas #suceder dentro del hormigón, puesto que las probetas han sido selladas desde su fabricación y no han mantenido ningún tipo de contacto con el exterior ni ha existido ninguna pérdida de agua en las mismas. Los valores negativos de las deformaciones representan una retracción en el hormigón, mientras que valores positivos en el eje de ordenadas representan expansiones.

- CEMI

A continuación se han mostrado los resultados de la retracción autógena en los hormigones fabricados con CEMI.

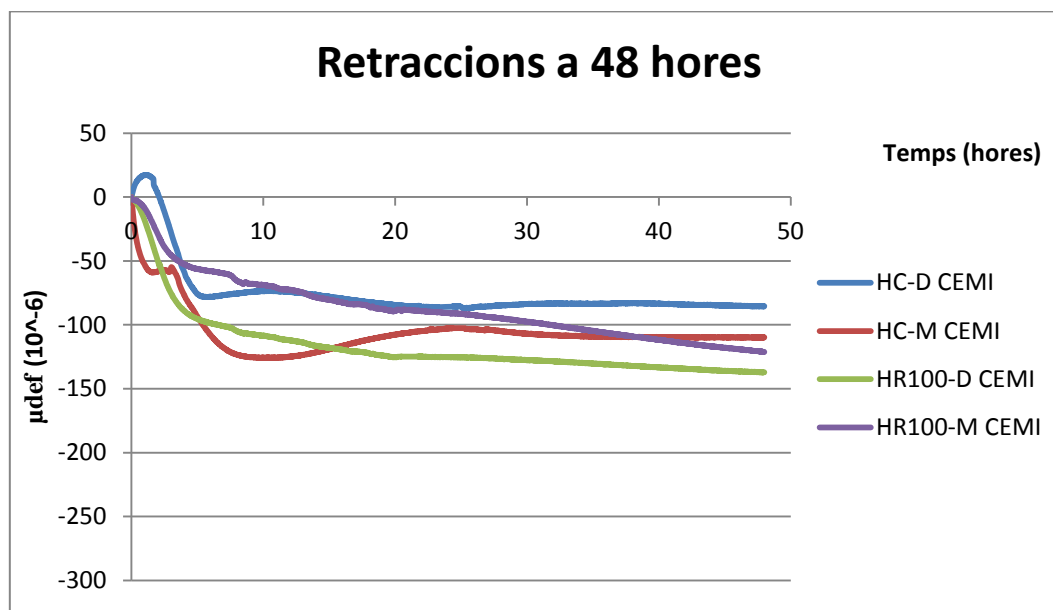


Gráfico 4.47. Comparativa de la retracción autógena entre los diferentes hormigones elaborados con CEMI (48 horas)

La primera conclusión que se puede observar esta relacionada con el instante en que sucede la estabilización de las trayectorias de deformaciones a retracción. Este instante corresponde, en los cuatro hormigones, aproximadamente a las 24 horas después del inicio de la fabricación. A partir de este momento no se observa ningún cambio brusco más en la retracción de ningún hormigón.

Por otro lado, existe una diferencia de valores de retracción entre los hormigones con áridos normales y los hormigones con áridos reciclados. Estos últimos han sufrido, en media, una mayor retracción, superando en los dos casos (fabricación con agua natural y agua marina) las $120 \cdot 10^{-6}$ microdeformaciones.

Por último, destacar que la utilización de agua marina provoca una mayor retracción en las probetas de hormigón estudiadas. A pesar de que en el instante del gráfico anterior (a las 48 horas) la retracción del hormigón HR100-M es menor que la del HR100-D, la tendencia de su trayectoria ya denota un cambio de patrón en un intervalo a corto de tiempo.

- CEMIII

A continuación se han mostrado los resultados de la retracción autógena en los hormigones fabricados con CEMIII. Igual que en el caso anterior, primero se han analizado las retracciones de las primeras 48 horas.

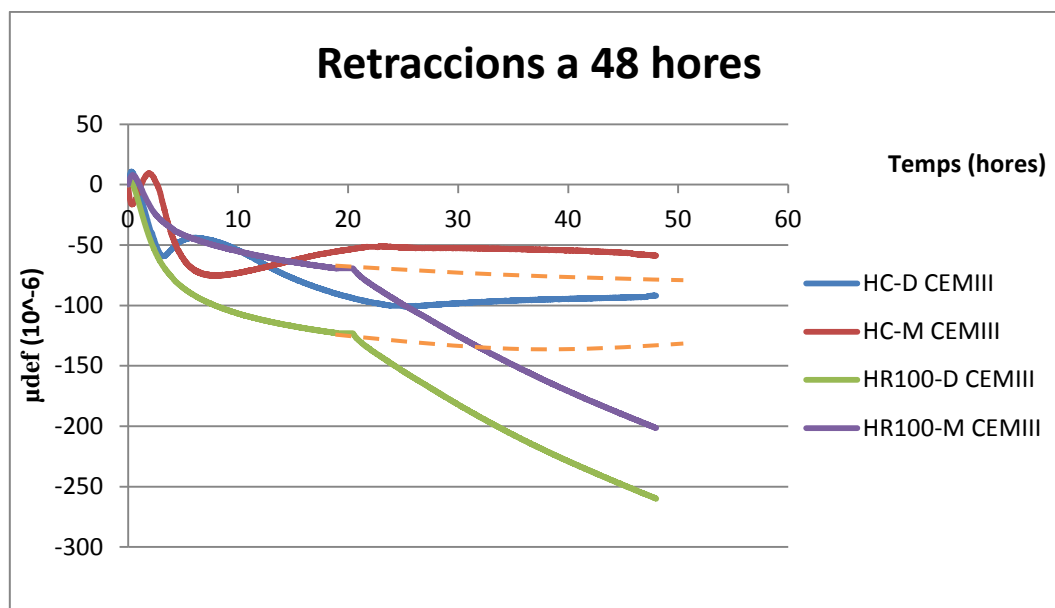


Gráfico 4.48. Comparativa de la retracción autógena entre los diferentes hormigones elaborados con CEMIII (48 horas)

En el gráfico se observa un cambio clarísimo de tendencia a las 20 horas del inicio de fabricación. Teniendo en cuenta este cambio de tendencia, y que a partir de este punto el comportamiento no es el esperado, se concluye diciendo que se trata de un error. Así mismo, se ha corroborado el error con otros datos tomados en diferentes canales del mismo sistema de adquisición de datos. El desajuste en el sistema de adquisición de datos ha podido ser causado por una subida de tensión al conectar demasiadas probetas a la vez. En el gráfico anterior, se ha marcado con una línea discontinua de color naranja la tendencia esperada por ambas trayectorias. Se puede intuir como siguiendo esta tendencia los resultados obtenidos son mucho más lógicos y esperables.

A continuación se ha realizado un análisis considerando las tendencias con las líneas discontinuas. Teniendo en cuenta este comportamiento esperado, se puede ver cómo se obtiene un resultado muy similar al obtenido con el CEMI. En estas probetas también se logra una mayor retracción en el hormigón fabricado con árido reciclado que en el hormigón con árido convencional. A pesar de que en el gráfico se observa que la trayectoria de deformaciones del hormigón HC-D muestra una mayor retracción que el hormigón con árido reciclado y agua de mar, HR100-M, se ve como esta tendencia hará que se cambie el patrón y pase a tener más retracción este último.

Analizado el conjunto de resultados del ensayo de retracciones autógenas, se puede concluir que la utilización de áridos reciclados en la fabricación de hormigones no influye significativamente en la retracción autógena de los mismos. Aun así, comparando el valor de las microdeformaciones, se puede decir que el efecto de las retracciones autógenas no es tan importante como las obtenidas en las otras retracciones.

4.5.3 RETRACCIÓN DE SECADO

Este estudio también se ha separado en una explicación en lo referente al hormigón fabricado con cemento tipo CEMI y cemento tipo CEMIII. En cada subgrupo se ha comparado el efecto que supone la fabricación con áridos reciclados y agua de mar en la retracción de secado, contrastándolos con los hormigones de control (hormigones convencionales). Todas las medidas se han realizado hasta los 28 días, tomando datos a las edades de 3, 7, 14, 21 y 28 días.

Como ya se ha explicado anteriormente, la toma de medidas de este ensayo ha sido manual, mediante un comparador de longitud. A continuación se muestran los gráficos que resumen el conjunto de resultados en la adquisición de datos, es decir, los valores de variación de longitud y peso de las probetas fabricadas.

Antes de nada se ha analizado la retracción de secado en los hormigones fabricados con CEMI.

- CEMI

Dentro de los hormigones elaborados con cemento tipo CEMI, primeramente se estudia la retracción de secado con la variación de longitud de las probetas.

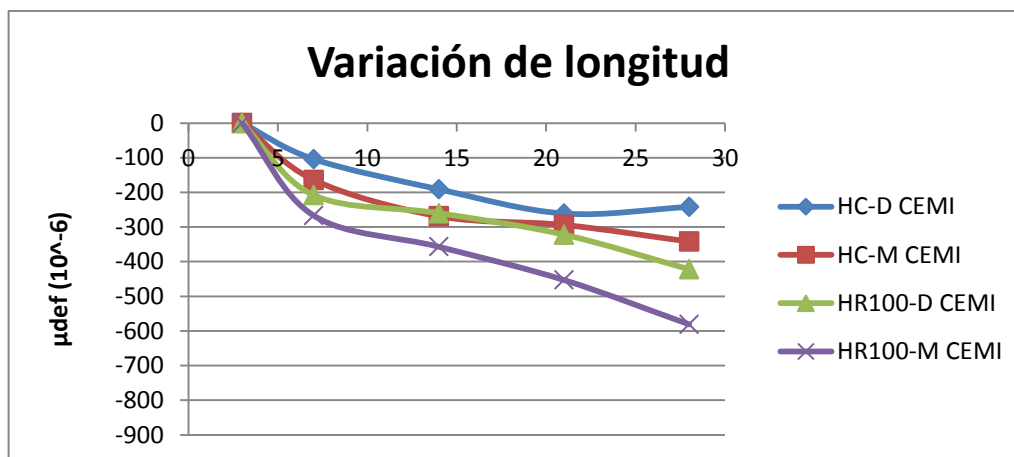


Gráfico 4.49. Comparativa de la variación de longitud en las probetas de retracción de secado. CEMI

Se recuerda que en este ensayo las variaciones de longitud y peso han sido medidas a partir de las 72 horas desde su fabricación, las necesarias para la toma de las probetas para desencofrar, y al sumergirlo en agua durante dos días.

Mirando el gráfico se puede observar cómo las probetas fabricadas con hormigón convencional han sufrido una menor retracción por secado que las probetas con áridos reciclados mixtos. Si se fija el tiempo en 28 días, se observa un incremento del valor de retracción del 74,38 % entre el hormigón convencional y el hormigón con un 100 % de sustitución de áridos reciclados, para la fabricación con agua natural. Para la fabricación con agua marina, este porcentaje corresponde a un 69,88 %. Queda comprobado numéricamente que hay una gran diferencia entre la retracción con y sin áridos reciclados. Esta diferencia es debida a varias características y propiedades de los áridos reciclados presentes en el hormigón.

Por un lado el cloruro cálcico (CaCl_2) presente en los áridos reciclados mixtos hace aumentar el valor de la retracción por secado [54], el valor del módulo elástico de estos, es menor al de los áridos naturales, hecho que provoca que la pasta de cemento pueda deformarse más [54], y por último, la mayor porosidad de los áridos reciclados mixtos provoca también que la pasta de cemento pueda ocupar más espacios y así retraerse más [54].

Otra conclusión que se puede extraer de estos resultados es la diferencia entre hormigones fabricados con agua natural y agua de mar. En los hormigones fabricados con agua marina se observa una mayor variación de longitud de las probetas, es decir, existe una mayor retracción de secado. Si se comparan numéricamente estas variables (fijando un tiempo de 28 días), se obtiene un incremento en porcentaje del 41,32 % en hormigones con áridos convencionales, y un 37,68 % en hormigones fabricados con áridos reciclados. Estas diferencias se deben a que en las probetas fabricadas con agua de mar, inicialmente las sales que contiene el agua ocupan un espacio que al reaccionar el agua con el cemento y evaporarse parte del agua también se evaporan las sales dejando más huecos y provocando mas retracción.

A continuación se estudia la retracción de secado mediante los resultados obtenidos por la variación de masa de las probetas.

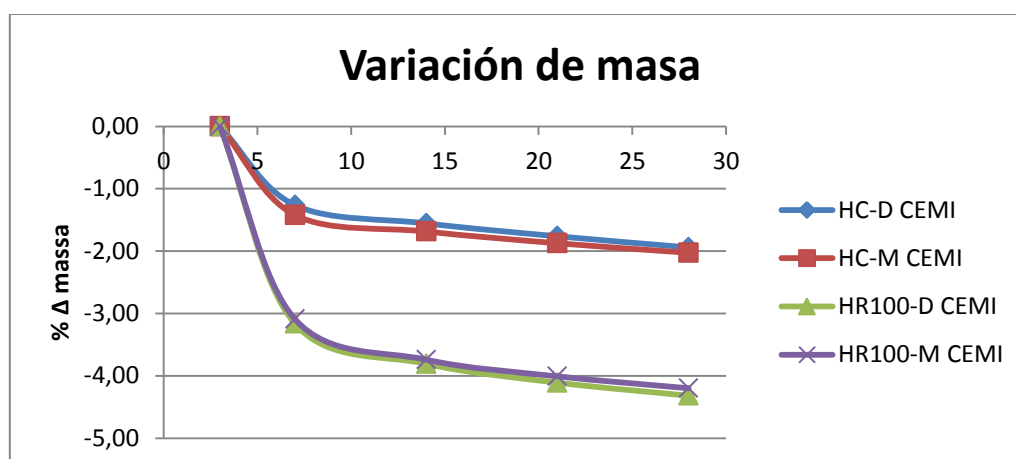


Gráfico 4.50. Comparativa de la variación de masa en las probetas de retracción de secado. CEMIII

Con este ensayo de retracción se ha comparado la variación de masa entre los diferentes tipos de hormigones, puesto que esta viene relacionada con la cantidad de agua que tenía el hormigón e, indirectamente, con la retracción de secado sufrida por el material.

Se observa que los hormigones con menores deformaciones han sido los hormigones convencionales, obteniendo una variación de masa próxima al 2 %. Este hecho era de esperar, puesto que los áridos normales de los hormigones convencionales contenían menos agua que los áridos reciclados. Por otro lado, este resultado se puede relacionar con los datos del estudio anterior (variación de longitud de las probetas), donde se ha visto que los hormigones convencionales también eran los que sufrían un acortamiento menor.

En los hormigones elaborados con árido reciclado, el patrón de pérdida de masa en función del tiempo ha sido casi similar a la de los hormigones convencionales, pero con un desfase importante respecto a éstos. En el caso de utilizar áridos reciclados se ha observado una mayor

pérdida de masa, llegando a un porcentaje entre el 4 y el 4,5 % del peso total de la probeta. Este hecho corrobora lo dicho anteriormente, tanto el cloruro cálcico, como el bajo valor del módulo elástico, como la mayor porosidad, producen un aumento de la retracción de secado de los hormigones fabricados con los áridos reciclados mixtos.

Otra conclusión que se ha podido extraer de estos resultados es la poca diferencia que existe entre los hormigones elaborados con agua de mar y agua dulce en relación a la variación de masa de las probetas. Si se analiza el anterior gráfico se puede observar como las trayectorias de los hormigones convencionales son casi idénticas entre ellas. Sucede lo mismo si se analizan los hormigones reciclados entre ellos.

La última conclusión extraída de este gráfico está relacionada con el instante de tiempo donde se produce la máxima variación de masa de las probetas. Este instante se produce a los 7 días, suavizándose la pendiente de la trayectoria justo después de este momento.

- CEMIII

A continuación se muestran los resultados de la retracción en los hormigones fabricados con cemento tipo CEMIII. Cómo en el caso anterior, primeramente se exponen los datos de retracción en función de la variación de longitud de las probetas.

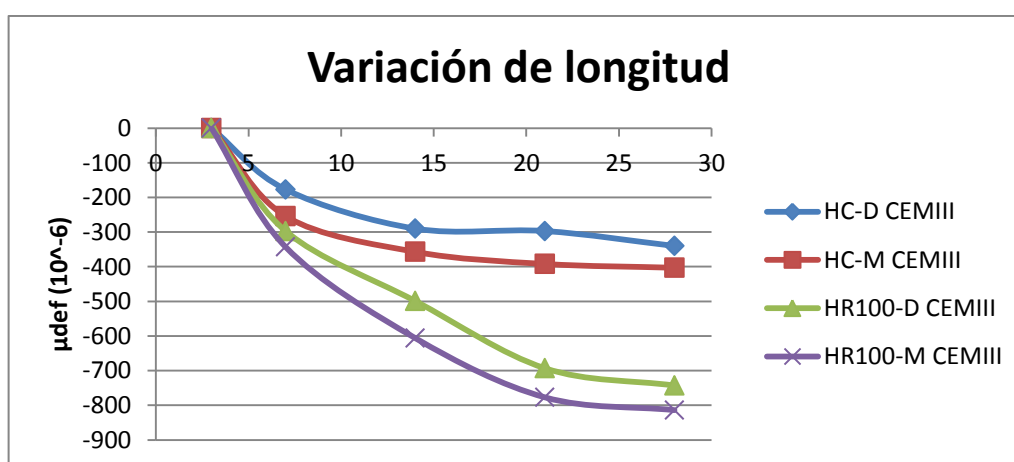


Gráfico 4.51. Comparativa de la variación de longitud en las probetas de retracción de secado. CEMIII

En este caso sucede lo mismo que en el caso de los hormigones fabricados con CEMI. Los hormigones con una menor deformación han sido los convencionales, mientras que los hormigones con un 100 % de sustitución de áridos normales por áridos reciclados han obtenido una variación de longitud superior, llegando a lograr una variación del doble que sus respectivos homólogos convencionales a los 28 días. La explicación dada por este hecho es la misma que en el anterior caso, la superior porosidad de los áridos reciclados junto con el bajo valor del módulo elástico y la presencia del CaCl_2 provoca mayores retracciones en los hormigones fabricados con áridos reciclados.

En cuanto al estudio de los efectos por el agua de mar, vuelve a suceder el mismo que en el caso anterior. Se observa una mayor variación de longitud en las probetas elaboradas con agua de mar, tanto en los hormigones convencionales como en los fabricados a partir de áridos

reciclados debido a que las sales que ocupaban un espacio dentro del hormigón se evaporan con el agua o reaccionan con el cemento dejando más espacio libre susceptible de retraerse. Es necesario decir pero, que esta diferencia de variación de longitud no es tan notoria como la producida por la utilización de árido reciclado. Mientras la variación del incremento de longitud a los 28 días debido a la utilización de un tipo de agua u otro oscila entre el 9,56 % (HR100) y el 18,53 % (HC), la variación originada por los áridos reciclados supone entre un 101,98 % (agua de mar) y un 118,53 % (agua dulce).

Por último se observa una mayor variación de la retracción de secado en los hormigones fabricados con CEM III, este hecho se debe a la presencia de escorias puzolanicas en un 30-40% en la composición de este cemento, las escorias no reaccionan con el agua hasta que todo el Clinker no ha reaccionado con el agua, por lo tanto retrasa el tiempo de fraguado y aumenta la retracción de secado [54].

A continuación se estudia la retracción de secado mediante los resultados obtenidos por la variación de masa de las probetas.

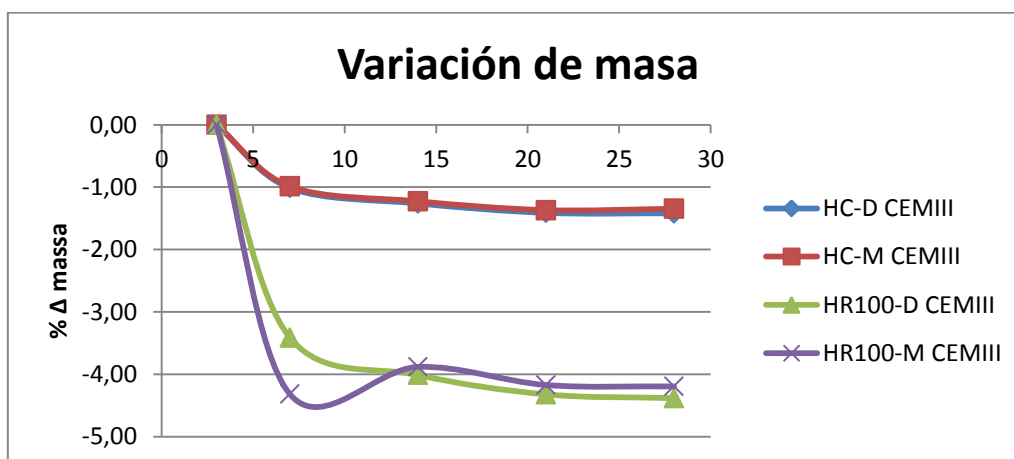


Gráfico 4.52. Comparativa de la variación de masa en las probetas de retracción de secado. CEMIII

Igualmente que con el cemento CEMI, los hormigones que han sufrido una mayor variación de su masa han correspondido a los fabricados con áridos reciclados. Fijando el instante de tiempo a 28 días de edad de los hormigones, se obtiene que el incremento de variación de masa corresponda aproximadamente al triple, tanto en fabricación con agua de mar como agua natural. Hay que destacar que este incremento proporcionado por la sustitución de áridos reciclados ha afectado mucho más en los hormigones fabricados con CEM III, que con el cemento CEMI.

Gráficamente este hecho se puede justificar observando ambas figuras 4.50 y 4.52, donde este último presenta una mayor distancia entre las trayectorias de los hormigones convencionales respecto a los fabricados con 100 % de áridos reciclados, es decir, existe una mayor influencia en la variación de la masa que en el CEMI.

En este caso tampoco existe una gran influencia del tipo de agua en los resultados. Al igual que el apartado respecto a los hormigones con CEMI, las trayectorias de los hormigones con agua dulce no distan mucho las trayectorias con agua marina.

En cuanto al instante de tiempo en que se produce la máxima variación de masa de las probetas, éste ha sucedido igualmente alrededor de los 7 días. A partir de este punto, la gráfica cambia de tendencia y suaviza su trayectoria. Este comportamiento era de esperar, puesto que en los primeros instantes, al estar más saturadas las probetas, existe una mayor pérdida de agua. En cambio, al cabo de un determinado tiempo, crece la dificultad de evaporar agua y se reduce la variación de masa de las probetas, estabilizándose la trayectoria del gráfico anterior.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Después de haber acabado la fase experimental y el análisis de los resultados, se han recogido en este capítulo las conclusiones pertinentes a cada uno de los apartados estudiados en el capítulo anterior.

5.1. ÁRIDOS

- El árido natural utilizado para las fabricaciones de los hormigones cumple con todos los requisitos exigidos por la UNE y la ASTM para que éstos puedan ser utilizados en la fabricación de hormigón en masa.
- Las propiedades físicas de las dos remesas de áridos reciclados mixtos no han variado significativamente, obteniendo una densidad seca y una densidad saturada similar. Por otro lado, la segunda remesa de áridos tenía una composición diferente, provocando un aumento en la capacidad de absorción.

5.2. HORMIGÓN

- La utilización del árido reciclado en estado húmedo en un 80% respecto a su capacidad de absorción, permite controlar con facilidad la trabajabilidad el hormigón con árido reciclado. No necesitando utilizar más cantidad de aditivo súperplastificante respecto al utilizado en el hormigón convencional.

5.2.1 PROPIEDADES FÍSICAS

- Los hormigones fabricados con árido reciclado mixto cumple todos los requisitos en cuanto a densidad seca exigida en el Pliego de Prescripciones Técnicas del Puerto de Barcelona.
- Los hormigones elaborados con áridos reciclados han resultado menos densos que los hormigones convencionales debido a que el árido natural tiene una densidad superior al árido reciclado.
- En la fabricación de los hormigones con árido reciclado se ha observado que la utilización de agua de mar aumenta la densidad seca y disminuye el volumen de poros accesibles y la absorción respecto a la fabricación de los hormigones con agua natural. La explicación a este hecho es que el agua de mar es más densa, provocando que las sales disueltas ocupen más espacio dentro de los poros accesibles de los hormigones.
- El volumen de poros accesibles en el conjunto de hormigones reciclados es muy superior al obtenido en los hormigones convencionales, puesto que los áridos reciclados son mucho más porosos que los áridos naturales.

- La influencia del agua de mar en el ensayo de volumen de poros accesibles es mayor en los áridos reciclados porque el volumen de poro crece con el porcentaje de sustitución de los áridos reciclados.
- La absorción ha resultado ser menor en los hormigones elaborados con cemento CEMIII respecto a los hormigonados con cemento CEMI, puesto que las escorias de alto horno presentes en el CEM III hacen obtener más cantidad de CSH.

5.2.2 PROPIEDADES MECÁNICAS

- Tanto los hormigones convencionales como los hormigones reciclados fabricados con diferentes porcentajes de árido reciclado, han alcanzado la resistencia a compresión mínima exigida de 30 MPa, por el Pliego de Preinscripciones Técnicas del Puerto de Barcelona. Tanto para las fabricaciones con CEM III, CEM I, agua de mar y agua dulce.
- La resistencia a compresión de los hormigones con áridos reciclados ha resultado ser menor que la resistencia de los hormigones con áridos naturales. A medida que se aumenta el porcentaje de sustitución de los áridos reciclados en el hormigón, este proporciona una resistencia a compresión menor. Además la utilización de agua de mar en los hormigones reciclados proporciona un aumento en la resistencia a compresión de estos.
- La resistencia de todos los hormigones estudiados ha superado el mínimo exigido (4MPa) para la construcción de pavimentos portuarios según el Pliego de Preinscripciones Técnicas del Puerto de Barcelona.
- En la resistencia a flexo-tracción influye mucho la adherencia entre árido y pasta de cemento. Los hormigones fabricados con agua marina obtienen mayores resistencias a flexo-tracción que los fabricados con agua dulce. El porcentaje de sustitución de áridos reciclados no influye en el aumento o disminución de la resistencia a flexo-tracción.
- La sustitución de áridos reciclados influye en el valor del módulo elástico de los hormigones. Cuanto mayor es este porcentaje de áridos menor es el valor de módulo de elasticidad obtenido. Por otro lado el agua de mar hace aumentar el módulo elástico en la fabricación de los mismos.

5.2.3 TIEMPO DE FRAGUADO

- El agua de mar acelera tanto el inicio como el final de fraguado del hormigón puesto que los cloruros disueltos en el agua de mar pueden actuar como acelerantes.
- La fabricación con áridos reciclados retrasa el tiempo de fraguado debido a la mayor cantidad de agua presente en los mismos y a la presencia de yeso en la composición de éstos.
- Los hormigones fabricados con cemento tipo CEMIII presentan un tiempo de fraguado mayor que los fabricados con cemento tipo CEMI debido a que la escoria de alto horno

no reacciona con el agua hasta que todo el Clinker lo ha hecho, retrasando así el tiempo de fraguado.

5.2.4 RETRACCIONES

- Los hormigones con áridos reciclados obtienen menores retracciones plásticas que los hormigones convencionales debido a la mayor cantidad de agua presente en los áridos reciclados. El agua de mar puede provocar una reducción de la retracción plástica. Este hecho es debido a la presencia de abundantes sales disueltas en el agua de mar, estas provocan que haya una menor cantidad de agua libre y, por lo tanto, una menor evaporación de agua hacia el exterior.
- En los hormigones con una media relación agua/cemento la utilización de áridos reciclados no afecta significativamente en la retracción autógena. El valor de la retracción autógena para los hormigones con una media relación agua/cemento es poco significativa comparada con los otros tipos de retracciones.
- Los valores de retracción de secado en los hormigones elaborados con áridos reciclados son superiores a los obtenidos en los hormigones convencionales. Este fenómeno es debido a la mayor porosidad, y el bajo módulo elástico y la presencia de cloruro cálcico de los áridos reciclados mixtos, provocando una mayor retracción de secado.
- El agua de mar provoca un aumento de la retracción de secado. Este hecho es debido a que, a largo plazo, al evaporarse el agua de mar, también lo hacen las sales disueltas en la misma, provocando más espacio libre en la mezcla y una mayor facilidad para que el hormigón retraiga.

5.3. CONCLUSIONES GENERALES

Después de ver los resultados de los ensayos realizados se puede concluir lo siguiente:

- La utilización de agua de mar en la fabricación mejora las propiedades físicas y mecánicas de los hormigones sin afectar significativamente el valor de las retracciones.
- La utilización de áridos reciclados en la fabricación de hormigones reduce de forma general las propiedades mecánicas, así como las propiedades físicas. No obstante, con un bajo porcentaje de sustitución del árido natural por árido reciclado, se logran propiedades muy similares a las de los hormigones convencionales.

5.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Según lo expuesto y los resultados obtenidos a lo largo del estudio, se cree interesante seguir como futuras líneas de investigación con:

- Estudio de la durabilidad en la degradación del cemento utilizando agua de mar en hormigones armados.
- Posibilidad de compaginar inhibidores junto con el agua de mar en la fabricación de hormigones armados.
- Posibilidad de quitar tanto los yesos como otros componentes solubles de los áridos reciclados mixtos, para la fabricación de hormigones reciclados de mejor calidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] M C Limbachiya, A Koulouris, J J Roberts and A N Fried (2009), „Performance of Recycled Aggregate Concrete“, Publication in World Wide Web.
http://dircweb.king.ac.uk/paperseng/Limbachiya_MC2004_312431/Limba_Koulouris
- [2] Tam, V.W.Y., K. Wang, and C.M. Tam.: "Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis". J. of Hazardous Materials,. Vol. 152(2), (2008)
- [3] Jimenez, J.R.; Agrela, F.; Ayuso, J.; Lopez, M: Estudio comparativo de los áridos reciclados de hormigón y mixtos como material para subbases de carreteras. Mat de const. 61, (2010) 289-302
- [4] Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. Plan Nacional Integrado de Residuos para el periodo 2008-2015, BOE, no 49 (2009)
- [5] Report to DGXI, European Commission: Construction and Demolition Waste Management Practices, and Their Economic Impacts, (1999)
http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/cdw/cdw_report.htm
- [6] Ihobe. Sociedad Pública de Gestión Ambiental: Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de Residuos de Construcción y Demolición. Investigación pre normativa, (2011)
- [7] Ministerio de Fomento: Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)
- [8] Pliego de Preinscripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3. Ministerio de Fomento. Artículo 330-333.
- [9] Ministerio de Fomento: Instr. de Hormigón Estruct.(EHE-08), BOE, no 203 Suplemento, (2008)
- [10] Grupo de trabajo "Hormigón reciclado": Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Universitat Politècnica de Catalunya, (2002).
- [11] Hendriks, Ch.: The Building Cycle. Aeneas Tech.Pbl.The Netherlands, (2000)
- [12] Kasai, Y.: Guidelines and the Present State of the Reuse of Demolished Concrete in Japan. Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. Proceedings of the Third International RILEM Symposium, (1994) 93-104
- [13] RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures): Specifications for Concrete with Recycled Aggregates. Materials and Structures,27,(1994) 557-559
- [14] Vincke, J.; Rousseau, E.: Recycling of Construction and Demolition Waste in Belgium: Actual Situation and Future Evolution. Demolition and Reuse of Concrete and masonry. Proceedings of the Third International RILEM Symposium, (1994) 57-69

- [15] BS 8500-2:2002: Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part2: Specification for Constituent Materials and Concrete, (2002)
- [16] DIN 4226-1:2000: Concrete Aggregate, (2000) Análisis de la aplicabilidad de los áridos reciclados mixtos en hormigones 66
- [17] HONG KONG: Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates. Works Bureau Technical Circular (2002)
- [18] BRAZIL: Recycled Aggregate Standardization in Brazil. Universidade Estadual Paulista, Centro Universitario do Instituto Maua de Tecnologia, Universidade de Taubate (2002)
- [19] Gomez-Soberon, J M V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. Cem and Con Res, 32, (2002) 1301– 1311
- [20] Sanchez de Juan, M; Gutierrez, PA.: Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. Const. and Build Mat, 23, (2009) 872– 877
- [21] Paine, K.A.; Dhir, R.K.: Recycled aggregates in concrete: a performance-related approach. Magazine of Concrete Research, 62 (2010) 519-530
- [22] Paine, K.A.; Dhir, R.K.: Value added sustainable use of recycled and secondary aggregates in concrete. Indian Concrete Journal, 84, (2010) 7-26
- [23] M. Khatib: Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate, Cement and Concrete Research, 35 (2005) 763-769
- [24] Suzuki M., Seddik Meddah M., Sato R.: Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high–performance concrete, Cement and Concrete Research, 39 (2009) 373-381
- [25] Semion Zhutovsky, Konstantin Kovler: Effect of internal curing on durability-related properties of high performance concrete, Cement and Concrete Research, 42 (2012), 20– 26
- [26] Masahiro Suzuki, Mohammed Seddik Meddah, Ryoichi Sato: Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete, Cement and Concrete Research, 39 (2009), 373-381
- [27] Berndt, M.L.: Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate, Const. and Build. Mat.,23 (2009) 2606 2613
- [28] Kou, S.C; Poon, C.S.; Chan, D.: Influence of fly ash as a cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. ASCE Jour. of Mat. in Civil Eng., 19 (2009), 709- 717
- [29] Kou, S.C; Poon, C.S.; Chan, D.: Influence of fly ash as a cement addition on the properties of recycled aggregate concrete. Materials and Structures, 41 (2007), 1191 1201

- [30] Sanchez A. (directora Etxeberria M.) Análisis de la aplicabilidad de los áridos reciclados mixtos en hormigones, octubre 2011. <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/13978>
- [31] Etxeberria, Miren; González Corominas, Andreu & Valero, Ignacio. Application of recycled mixed aggregates in non-structural concrete in Barcelona city, Third Int. Conf. on Sust. Const. materials and Technologies, SCMT3, Kyoto, August 2013
- [32] Chausse Alejandro (directora M. Etxeberria), Utilización de agua marina en la fabricación de hormigones convencionales y reciclados, Tesina de grado Ingeniería. Civil, Esc. de Ing. de CCP de Barcelona de la UPC, 2013.
- [33] Jesús Manuel Fernández Vecino (directora M. Etxeberria),, Caracterización del hormigón fabricado con árido reciclado para aplicaciones portuarias, Tesis de Master de Ingeniería Civil, Esc. de Ing. de CCP de Barcelon
- [34] Etxeberria, M; Vazquez, E; Marí, A.: Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete, Magazine of Concrete Research, 58 (2006) 683–690
- [35] Mas, B. et al.: Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use. Construcción and Building Materials (2011). doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.073
- [36] C. Thomas, J. A. Polanco, J. Setién, I. Lombillo: “DURABILIDAD EN AMBIENTE MARINO DE HORMIGÓN CON INCORPORACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS PROCEDENTES DE LA TRITURACIÓN DE HORMIGÓN” Artículos GTED (2010-2012)
- [37] Ihobe. Sociedad Pública de Gestión Ambiental: Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de Residuos de Construcción y Demolición. Investigación pre normativa, (2011)
- [38] Agrela, F. et al.: Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. Construcción and Building Materials, (2011). 3950-3955
- [39] Akash, R.; Kumar, N. Jhab; Sudhir, M.: Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. Resources, Conservation and Recycling, 50 (2006) 71-81
- [40] Kou, S.C et al.: Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks, Construction and Building Materials, 16 (2002) 281-289
- [41] Hansen TC, Begh E. Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate concrete. J Am Concr Inst 1985; 82(5):648–52.
- [42] Olorunsogo FT, Padayachee N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. Cem Concr Res 2002; 32:179–85.
- [43] Dhir RK, Limbachiya M, Leelawat CT. Suitability of recycled concrete aggregate for use BS 5328 designated mixes. Proc Inst Civ Eng Build 1999; 134:257–74.

- [44] Etxeberria M, Vázquez E, Marí A, Barra M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem Concr Res* 2007; 37:735–42.
- [45] Otsuki N, Miyazato S, Yodsudjai W. Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. *J Mat Civ Eng* 2003; 15(5):443–51.
- [46] RM. Senthamarai; P.Devadas Manoharan; D.Gobinath. “Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties” *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue 5, May 2011, Pages 2413–2419.
- [47] R.K. Dhir, K.A. Paine, J. de Brito, M. Etxeberria, N.Y. Ho, C.S. Poon, V.W.Y. Tam: “Use of recycled and secondary aggregates in concrete: an overview (2011).
- [48] José Mora-Ruacho , Ravindra Gettu , Antonio Aguado, “Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete” *Cement and Concrete Research* 39 (2009) 141–146
- [49] Shah, S. P., and Weiss, W. J., (2000) “High Strength Concrete: Strength, Permeability, and Cracking,” *Proceedings of the PCI/FHWA International Symposium on High Performance Concrete*, Orlando Florida, © 2000, pp. 331-340
- [50] Jianyong Li, Yan Yao, “A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete” *Cement and Concrete Research*, 2001, p 1203-1206.
- [51] M. Mollerparadi. “Concrete Durability in a Marine Environment” *Proceedings of Mario Collepardi Symposium on Advances in Concrete Science and Technology*, Rome 8 October 1997.
- [52] W. Chalee; C. Jaturapitakkul; P. Chindaprasirt. “Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater” *Science Direct*. 5 December 2008
- [53] Influence of seawater curing in standard and high strength submerged concrete. Pilar Alaejos,; Miguel Ángel Bermúdez. *Journal of materials in civil engineering*. ASCE. June 2011. Volume 23, Number 6. ISSN 0899-1561. CODEN: JMCEE7.
- [54] Neville AM. *Properties of Concrete*. 4th ed. 1995.